

## 医疗机器人双目视觉硬件系统设计与实现

吕家国<sup>1</sup>, 蒋晓瑜<sup>2</sup>, 张鹏炜<sup>1\*</sup>, 胡磊<sup>3</sup>

(1. 33393 部队 博士后科研工作站, 河北 保定 071000;

2. 装甲兵工程学院 信息工程系, 北京 100072;

3. 北京航空航天大学 机器人研究所, 北京 100191)

**摘要:**根据双目视觉定位原理,通过分析系统各部件的工作原理和医疗机器人手术导航的实际需求,结合市场供货情况,提出了一种适用于医疗机器人手术导航定位的双目视觉硬件系统设计方法。采用该方法设计的双目视觉定位系统进行了手术导航模拟实验,结果表明:该系统可以辅助医疗机器人完成手术规划,定位精度可以达到 2 mm,能够满足临床应用要求。

**关键词:**视觉测量系统;医疗机器人;双目视觉;跟踪定位

中图分类号:TP391 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20140702.0307

## Hardware design and implementation of binocular vision system for a medical robot

LYU Jia-guo<sup>1</sup>, JIANG Xiao-yu<sup>2</sup>, ZHANG Peng-wei<sup>1\*</sup>, HU Lei<sup>3</sup>

(1. *Post-doctoral Scientific Research Station of Unit 66393, Baoding 071000, China;*

2. *Department of Information Engineering, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China;*

3. *Robotics Institute, Beihang University, Beijing 100191, China)*

*\* Corresponding author, E-mail: zhpw1119@163.com*

**Abstract:** In this paper, a hardware design method of binocular vision system is proposed for the pose tracker of surgery. The working principle of the system components and the needs of the surgical navigation are analyzed firstly. Then according to the situation of market supply, each component is ascertained, and the system's structure is affirmed based on the binocular vision positioning principle. At last, a simulation experiment of surgical navigation is developed by prototype of binocular vision system. The experimental results show that with the aid of this system, the layout of the surgery can be carried out. At the same time, the positioning precision for the implant can reach 2 mm, which can satisfy the requirement of clinical application.

**Key words:** vision measurement system; medical robot; binocular vision; tracking and positioning

## 1 引言

三维定位是医疗机器人进行外科手术的关键。手术导航定位就是通过确定手术空间坐标系、图像坐标系和导航工具坐标系之间的映射关系,获得手术区域中目标点和手术器械的空间位置,其定位精度直接影响到手术的成败。现有的导航定位方法主要有机械定位、超声定位、电磁定位和光电定位等,其中光电定位是精度最高、使用最方便的方法,而双目视觉又是发展前景最好、应用最广泛的光电定位方式。目前,用于外科手术导航的立体视觉产品主要有 Claron Technology Inc. 的主动式可见光光学定位仪<sup>[1]</sup> (Micon Tracker, MT) 和加拿大 Northern Digital Inc. 的被动式红外光学定位仪<sup>[2]</sup> (Passive Polaris Spectra, PPS), 以及美国 Medtronic Inc. 的 Stealthstation Tria™ Plus (STP) 手术导航系统<sup>[3]</sup>。3 种仪器虽然定位精度高(0.2 mm)、性能稳定,但价格昂贵、技术封闭,不便于二次开发。另外,MT 定位仪工作范围小,PPS 定位仪和 STP 手术导航系统输出的视频信息单一、反射红外光标志物手术时消毒困难,不能更好地满足某些外科手术需要。国内虽有对立体视觉定位技术研究的报道<sup>[4-10]</sup>,但多数是集中在特征点提取、相机参数标定和立体匹配等方面的算法研究。如北京工业大学于乃功教授等人针对双目视觉测量以显著性标志物的关键点为目标,提出了基于颜色阈值分割的关键点实时检测和定位方法<sup>[4]</sup>;北京交通大学阮秋骑教授等人针对相机外参数标定的反复性,提出了一种基于云台转角的外参数估计方法<sup>[5]</sup>;浙江大学许允喜博士等人针对传统的运动估计算法受噪声影响很大,从而影响立体定位精度的问题,提出了基于 Levenberg-Marquardt 算法的运动参数优化算法,提高了匹配和定位精度<sup>[6]</sup>。在系统开发方面,四川大学、哈尔滨理工大学及西南石油大学等高校及研究机构近年来做过相关的研究<sup>[7,8,10]</sup>,但均处于实验论证阶段,至今未见有成熟产品应用。

针对当前国内用于手术导航定位技术的现状,以及外科手术对手术器械和病灶点定位精度的要求,本文提出了一种双目视觉硬件设计方法。

该设计根据系统工作的技术要求,充分考虑器件的性价比、供货渠道、产品售后服务及产品性能升级等综合因素,选取合适的光学镜头、摄像机和双目视觉结构。最后,在自行编制软件的驱动下,实现了医疗机器人手术导航的跟踪定位。

## 2 硬件设计方案

### 2.1 光学镜头的选取

光学镜头选型是双目视觉系统从图像获取直至目标定位与跟踪的最重要的环节之一,镜头质量的好坏直接决定和影响了视觉系统的性能与精度<sup>[11-13]</sup>。因此,根据视觉系统的性能指标,分析、计算光学镜头的指标要求,选择满足使用要求、价格合适的镜头,是整个视觉系统成功与否的重要步骤。

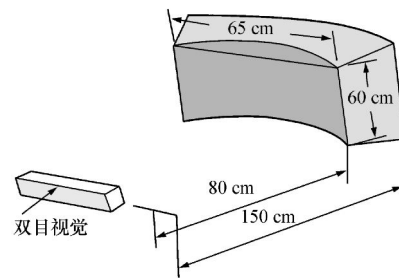


图1 手术导航的视觉工作范围

Fig. 1 Visual range of surgical navigation

根据手术导航定位精度和工作范围要求,假定实验样机的工作范围为图1所示的灰色圆环区域。对于左右对称结构的双目视觉系统,其在  $OXZ$  平面内的投影如图2所示<sup>[14]</sup>。图2中,视觉系统的最近工作距离  $L$ 、垂直工作范围  $D$  和要求

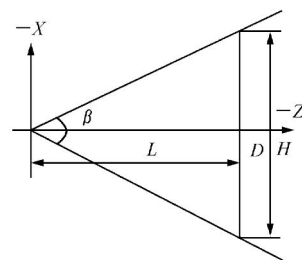


图2 平行光轴双目视觉垂直视场

Fig. 2 Parallel binocular vertical field of view

的垂直视场 $\beta$ 三者之间满足有如下关系式:

$$\beta = 2\arctan\left(\frac{D}{2L}\right). \quad (1)$$

根据视觉系统工作范围要求; $D_{\min} = 60$ ,  $L_{\min} = 80$ ,由式(1)求得 $\beta = 41.1^\circ$ 。据市场调研,目前性价比较高的测量用摄像机,多选用光敏面为1.27 cm的CCD。因此,根据估算的垂直视场角 $\beta = 41.1^\circ$ ,选用适于1.27 cm CCD的工业镜头。通过查询市场上能够购买到的标准C接口的镜头型号可知,日本KOWA公司设计并生产、适用于1.27 cm CCD的NCL系列的工业镜头应为首选<sup>[15]</sup>。其中焦距为6 mm的LM6NCM<sup>[16]</sup>是一款百万像素级的工业镜头,中心分辨率高达120 lp/mm,变形率仅为-0.2%,非常适合于机器人视觉视场大、分辨高、畸变小的要求,因此本系统选用了LM6NCM镜头。

## 2.2 摄像机的选取

选取摄像机时主要应考虑摄像机输出图像的信号形式、图像格式、色彩、分辨率及帧频等内容。

摄像机按输出图像信号的形式可分为模拟摄像机和数字摄像机两大类<sup>[17]</sup>。模拟摄像机受图像采集卡性能的限制,经过CCD所成的物理像元与传送到计算机的数字图像像元之间没有严格的一一对应关系,因此,用作图像测量时应尽可能选用数字摄像机;数字摄像机内部集成了A/D转换电路,可以直接将CCD光敏元输出的模拟图像信号转化为数字量,不受标准电视视频格式的制约,物方像元与显示的数字图像像元之间具有严格的一一对应关系。因此,为了满足手术导航定位的精度需求,本系统的摄像机应选用数字大阵列摄像机。

摄像机按输出图像的色彩分为黑白和彩色两种。黑白摄像机输出数字图像的每个像素点对应一个感光像元,该像元对于各种波长的光具有较为一致的敏感度,输出信号的大小对应于被采集图像的亮度和色彩信息,但仅表现为图像像素的灰度值。彩色摄像机根据其结构形式分为单片彩色摄像机和3片彩色摄像机两种<sup>[18]</sup>。单片彩色摄像机的像素阵列按一定方式进行R、G、B颜色排列,其输出信号在每一时刻也只有R、G、B三色中的一种,其它颜色需由邻近像元的同颜色信号

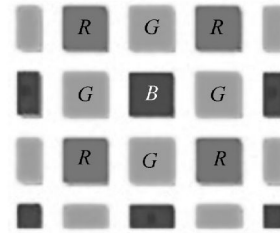


图3 BAYER彩色摄像机原理图

Fig. 3 Schematic diagram of BAYER color camera

通过插值计算得到,如图3所示。

可见,单片彩色摄像机输出的图像信号,不仅存在彩色失真,而且在R、G、B滤光时还会损失某些图像信号,因此不适宜图像测量的场合使用。而3片彩色摄像机输出的每个像素的彩色信息(如图4所示),分别来自R、G、B3个光敏元的相应像元,输出的图像质量好、颜色真实、细节完整,但价格也较昂贵。

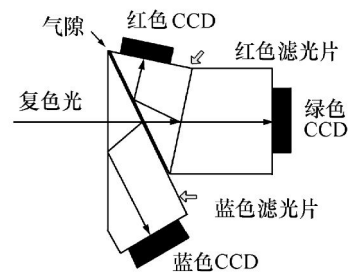


图4 3CCD彩色摄像机原理图

Fig. 4 Schematic diagram of 3CCD color camera

对于医疗机器人双目视觉系统,其主要功能是跟踪定位,精确摄取图像位置信息是关键。而单片彩色摄像机存在图像信号损失,3片彩色摄像机虽然以昂贵的价格保证了图像信息的完整性,但其丰富的颜色信息对双目视觉跟踪定位标记物并没有更多贡献。因此,通过以上分析,综合多种因素,应选用黑白摄像机。

图像分辨率与帧频是摄像机工作性能的重要指标,图像分辨率越高,帧频越高,视频图像的效果越好,相应的造价也越高。另外,受数字摄像机图像处理器工作频率所限,一般图像分辨率越高,像素数越多,帧频相对越低。因此,在选择摄像机时不能盲目追求高分辨率,而要根据任务需求适当选取。根据手术导航目标跟踪定位要求,在距

摄像机透镜前端 800 ~ 1 500 mm 的平行平面内,定位精度要求达到 1 mm。确定摄像机分辨率的过程如下:

根据光学成像原理有:

$$\frac{\Delta u}{f} = \frac{\Delta D}{L}, \quad (2)$$

式中,  $\Delta u$  为单位像素边长,  $f$  为镜头后焦距,  $\Delta D$  为定位精度,  $L$  为物距。

由于镜头 LM6NCM 的后焦距  $f = 8.2$  mm, 当  $L = 1\ 500$  mm,  $\Delta D = 1$  mm 时, 由式(2)可得  $\Delta u = 0.005\ 47$  mm。

由于 1.27 cm CCD 传感器的长宽比为 4:3, 靶面的对角线长为  $l = 8$  mm, 宽度  $w = 6.4$  mm, 高度  $h = 4.8$  mm, 则要求 CCD 面阵的水平像素数  $u = 6.4 / 0.005\ 47 \approx 1\ 170$ , 垂直像素数为  $v = 4.8 / 0.005\ 47 \approx 877$ 。

因此, 根据系统的定位精度要求, 摄像机的图像分辨率(即传感器敏感单元阵列)不得小于  $1\ 170 \times 877$ 。综合考虑以上各种因素, 结合满足要求的工业摄像机产品的发展, 系统可选用 DH-SV1420FM 黑白 CCD 工业数字摄像机<sup>[19]</sup>。

### 2.3 双目视觉传感单位结构

为了方便左右摄像机对应像点匹配, 选用如图 5 所示的近似平行光轴双目视觉结构。因此, 系统还需确定双目视觉结构两摄像机之间的距离  $B$ (通称基线)。根据立体视觉理论<sup>[20-21]</sup>, 基线越长, 立体视觉的计算误差越小, 但在摄像机视场角一定的情况下, 两摄像机的共同视野(即视觉系统的工作范围)也越小。因此, 对于平行光轴双目视觉, 在误差允许范围内基线的长度主要决定于视场。

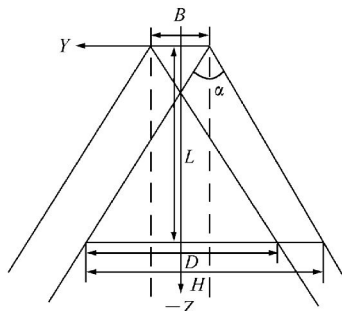


图 5 平行光轴双目视觉水平视场

Fig. 5 Parallel binocular Horizontal field of view

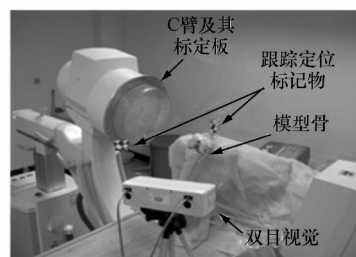
根据图 5 所示结构, 可得如下关系式:

$$\frac{B \cdot \operatorname{tg}(90^\circ - \alpha/2)/2}{L - B \cdot \operatorname{tg}(90^\circ - \alpha/2)/2} = \frac{B}{D}. \quad (3)$$

由文献[14]可知, 当选用 LM6NCM 时,  $\alpha = 56.2^\circ$ ; 由图 1 手术导航的视觉工作范围要求:  $D = 650$  mm,  $L = 800$  mm, 由式(3)可解得  $B = 199.36$  mm。因此, 样机选用基线  $B = 200$  mm。

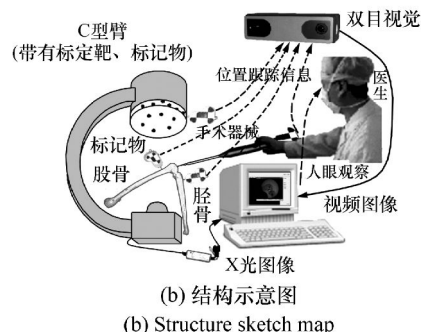
### 3 手术导航模拟实验

利用本方法设计的硬件结构, 在自行编制的软件驱动下, 对前交叉韧带重建手术导航进行模拟实验, 如图 6 所示。该手术导航系统主要是为医生提供一种基于 X 线图像和视频图像的手术导航方法, 能够实时检测手术器械、解剖目标以及 C 臂的精确位置, 并显示在术中 X 线图像上, 为医生呈现良好的视觉判断效果<sup>[22-23]</sup>。系统具备的基于股骨四分格的隧道入点规划、手术器械实时跟踪、撞击检测与手术过程仿真, 以及规划入点的不等距性评估等功能, 均是在双目视觉对标记物的实时跟踪定位情况下实现的。



(a) 实验布局

(a) Experimental layout



(b) 结构示意图

(b) Structure sketch map

图 6 手术导航系统硬件平台

Fig. 6 Hardware platform of surgery navigator

#### 3.1 实验平台

图 6(a) 所示, 硬件平台主要包括: 双目视觉

及其跟踪定位标记物、C 臂及其标定板、模型骨等。实验中,双目视觉用于术前 C 臂标定和模型股三维重建,术中实时跟踪手术环境中附加标记物的多个目标(C 臂、手术部位、手术器械等)。此时标记物作为目标的参考坐标,被双目视觉实时跟踪定位,如图 6(b)所示。

软件平台集成了人机交互、双目视觉控制[24-29]、手术规划、术中跟踪定位、计算机仿真等功能模块,如图 7 所示。

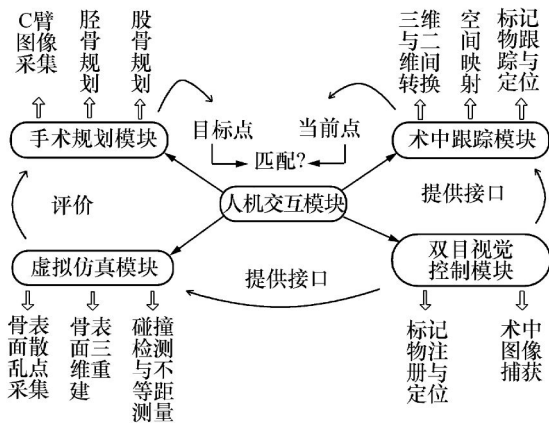


图 7 软件平台设计框架

Fig. 7 Framework of software platform design

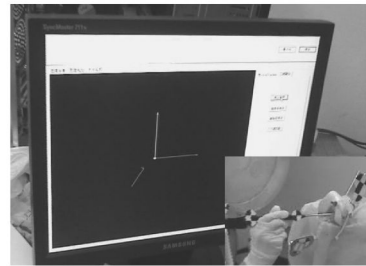
### 3.2 实验步骤

- (1) 分别在模型股、C 臂和手电钻上安装跟踪标记物,调整操作空间布局,标定双目视觉参数;
- (2) 利用导航探针,在双目视觉系统的最佳工作空间内,重建模型股三维表面;
- (3) 利用导航探针规划胫骨和股骨的隧道入点;
- (4) 利用 OpenGL 建立三维仿真环境,将规划好的隧道入点映射到重建的个体化骨面上;
- (5) 导航钻孔:用安装有标记物的手电钻,在双目视觉检测下钻孔,此时钻头的路径也会实时地显示在图像监视器上,这样便于与规划路径比较,从而及时纠正钻孔偏差;
- (6) 按常规方法植入移植物,完成后续操作。

### 3.3 实验结果与分析

(1) 利用安装标记物的导航探针,在双目视觉探测下,采集关节表面上的三维点坐标(点云数据),可以重建出股骨和胫骨的三维表面,如图 8(a)、(b)所示。

(2) 在胫骨、股骨规划操作中,导航探针在模



(a) 云数据采集

(a) Cloud data collection



(b) 三维表面重建

(b) 3D surface reconstruction

图 8 关节表面点云数据采集与重建

Fig. 8 Acquisition point cloud data and reconstruction

型股表面滑动时,双目视觉探测的探针末端能够叠加显示在规划图像上,如图 9 所示。当导航探针末端图像与术前规划点重合时,导航探针末端所指模型股表面点与实际手术的隧道入点相符。

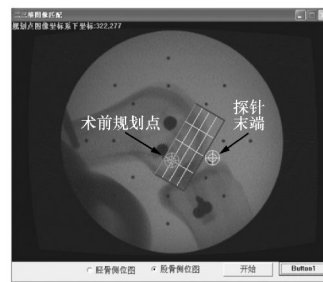


图 9 规划图像上的位置跟踪

Fig. 9 Position tracking in the programming image

(3) 在规划结果进行不等距评估中,安装标记物的股骨和胫骨从完全伸展位到完全屈曲位缓慢运动时,重建面同样作随动运动,如图 10 所示。

(4) 在模型骨的二维透视图像与三维实物匹配时,记录模型骨内嵌 8 个钢珠标记点的三维坐标值,与匹配后探针末端实测的三维坐标值相比较,以确定系统的定位精度。测试结果如表 1 所示,距离误差在 2 mm 以内。



图10 视频跟踪与虚拟仿真

Fig. 10 Video tracking and virtual simulation

表1 精度测试数据

Tab. 1 Precision test data

(单位:mm)

编号	图像上匹配时的标记物坐标			实际标记物坐标			误差距离
	X	Y	Z	X	Y	Z	
1	22.09	50.79	-174.05	23.08	51.27	-173.53	1.22
2	1.30	50.96	-178.74	1.09	51.67	-179.36	0.97
3	7.43	33.23	-166.68	9.89	34.13	-166.06	2.70
4	-12.03	32.84	-169.73	-11.65	33.24	-169.15	0.80
5	-4.23	20.23	-169.25	-2.99	21.04	-168.75	1.56
6	4.03	1.73	-162.26	4.13	2.44	-162.59	0.79
7	-20.72	4.40	-168.49	-21.24	3.39	-166.17	2.59
8	4.17	-16.56	-181.28	4.70	-15.14	-179.76	2.14

两点距离误差的均值:1.59

由(1)~(3)可知,该双目视觉能够检测出C臂、模型股和手术器械之间的空间坐标转换关系,实时跟踪手术器械,可以重建出模型骨的三维表面,制定出合理的手术规划方法(股骨、胫骨隧道入点位置和钻孔路径,移植物与髁间窝前缘的撞击检测),完成手术过程的虚拟仿真和规划效果的运动评估,从而辅助医生完成钻孔手术。分析(4)中的精度测试结果,该误差主要由双目视觉和C臂的参数标定误差、导航探针标记物的识别与匹配误差以及二维透视图像与三维实物间的匹配误差等多方面因素产生的。因此,减小误差的产生,除进一步优化相关算法外,加强使用者的操作熟练程度也是至关重要的。

## 4 结 论

本文在详细分析双目视觉硬件系统组成和结构的基础上,结合交叉韧带手术导航定位的实例,阐明选用本设计方案的理论及现实依据。运用该设计方案开发的双目视觉跟踪定位仪样机,进行了手术导航系统模拟实验。实验结果表明:该样机通过导航探针能够实现模型骨的三维重建以及导航探针在规划图像上的位置叠加跟踪,通过附加标记物坐标系能够实现虚拟仿真视频跟踪;运用由该导航系统进行的模型骨的二维透视图像与三维实物匹配,其匹配误差在2 mm之内,达到了临床手术的技术指标。

## 参考文献:

- [1] Claron Technology Inc. MicronTracker Developer's Manual;MTC3[EB/OL]. [2012-10-01]. <http://www.clarontech.com>.
- [2] Northern Digital Inc. Polaris Spectra Tool Kit Guide[EB/OL]. [2012-09-16]. <http://www.ndigital.com>.
- [3] 熊健斌,赵劲民,沙轲,等. 计算机导航技术在后交叉韧带重建胫骨隧道定位中的应用[J]. 中国组织工程研究与临

- 床康复,2011,15(17):3139-3142.
- XIONG J B,ZHAO J M,SHA K,*et al.*. Application of computer navigation system in tibial tunnel positioning during reconstruction of posterior cruciate ligament[J]. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu yu Linchuang Kangfu*,2011,15(17):3139-3142. (in Chinese)
- [4] 于乃功,马春燕,林佳. 基于双目视觉的关键点的检测方法 & 定位研究[J]. *计算机测量与控制*,2011,19(7):1565-1568.
- YU N G,MA CH Y,LIN J. Study on key point detection and localization based on binocular vision[J]. *Computer Measurement Control*,2011,19(7):1565-1568. (in Chinese)
- [5] 尚倩,阮秋琦,李小利. 双目立体视觉的目标识别与定位[J]. *智能系统学报*,2011,6(4):303-310.
- SHANG Q,RUAN Q Q,LI X L. Target recognition and location based on binocular stereo vision[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*,2011,6(4):303-310. (in Chinese)
- [6] 武学梅,刘奇. 基于立体视觉的手术导航光学定位系统[J]. *中国组织工程研究与临床康复*,2011,15(35):6584-6586.
- WU X M,LIU Q. Optical localizer of surgical navigation system based on binocular stereo vision[J]. *J. Clinical Rehabilitative Tissue Eng. Research*,2011,15(35):6584-6586. (in Chinese)
- [7] 王刚,卿粼波,滕奇志. 基于嵌入式平台的实时双目视觉测量系统[J]. *通信技术*,2011,44(10):55-60.
- WANG G,QING L B,TENG Q ZH. Binocular vision and real-time measure system based on embedded system[J]. *Communications Technology*,2011,44(10):55-60. (in Chinese)
- [8] 尤波,李楠,沈爱华,等. 基于双目立体视觉技术的轮式机器人位姿测量方法研究[J]. *机械设计与制造*,2011,(8):173-175.
- YOU B,LI N,SHEN A H,*et al.*. Study of position and posture measuring method for wheeled robot based on binocular stereo vision technique[J]. *Machinery Design Manufacture*,2011,(8):173-175. (in Chinese)
- [9] 许允喜,蒋云良,陈方. 基于2D-3D双目运动估计的立体视觉定位算法[J]. *光电工程*,2011,38(9):104-109.
- XU Y X,JIANG Y L,CHEN F. Stereo visual localization algorithm based on 2D-3D binocular motion estimation[J]. *Opto-Electronic Eng.*,2011,38(9):104-109. (in Chinese)
- [10] 秦大辉,毛婷,刘建军. 基于双目立体视觉的手持式光笔三坐标测量系统[J]. *制造技术与机床*,2011(8):133-136.
- QIN D H,MAO T,LIU J J. Study on 3D-coordinate measurement technology using handheld light-pen based on binocular stereoscopic vision system[J]. *Manufacturing Technology Machine Tool*,2011(8):133-136. (in Chinese)
- [11] 刘钧,高明. 光学设计[M]. 西安:西安科技大学出版社,2006:164-184.
- LIU J,GAO M. *Optical Design*[M]. Xi'an:Xidian University Press,2006:164-184. (in Chinese)
- [12] 李晓彤,岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计[M]. 杭州:浙江大学出版社,2007:231-254.
- LI X T,CEN ZH F. *Geometrical Optics, Aberrations and Optical Design*[M]. Hangzhou:Zhejiang University Press,2007:231-254. (in Chinese)
- [13] 李蕊,刘永基,王肇圻. 基于个体眼光学结构的波前眼镜设计[J]. *中国光学*,2012,(5):512-519.
- LI R,LIU Y J,WANG ZH Q. Design of wavefront-guided lens based on individual eye optical model[J]. *Chinese Optics*,2012,(5):512-519. (in Chinese)
- [14] 李林,黄一帆. 应用光学概念题解与自测[M]. 北京:北京理工大学出版社,2006.
- LI L,HUANG Y F. *Yingyun guangxue gainian tijie yu zice*[M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press,2006. (in Chinese)
- [15] Shanghai Yinrui Information Technology Co.,Ltd.. the Product Center for FA Lens of KOWA[EB/OL]. [2013-05-14] <http://www.yinrui.net/product.asp?id=3&pid=102>.
- [16] Shanghai Yinrui Information Technology Co.,Ltd.. the Product Manual of LM6NCM Lens[EB/OL]. [2013-05-14]. <http://www.yinrui.net/pdf/kowa/LM6NCM.pdf>.
- [17] 梁祖厚. 数字照相机[M]. 上海:上海科学技术文献出版社,2001:28-37.
- LIANG Z H. *Digital Camera*[M]. Shanghai:Shanghai Scientific and Technological Literature Publishing House,2001:28-37. (in Chinese)
- [18] 刘禾. 数字图像处理及应用[M]. 中国电力出版社,2006:27-61.
- LIU H. *Digital Image Processing and Application*[M]. China Electric Power Press,2006:27-61. (in Chinese)
- [19] China Daheng Group,Inc. DH-SV1420FC/FM digital camera instruction manual[EB/OL]. [2010-10-09]. <http://www.daheng-image.com>.
- [20] Hartley Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision*[M]. New York:Cambridge University Press,2000:237-360.

- [21] 全燕鸣,黎淑梅,麦青群. 基于双目视觉的工件尺寸在机三维测量[J]. 光学精密工程,2013,21(4):1054-1061.  
QUAN Y M, LI SH M, MAI Q Q. On-machine 3D measurement of workpiece dimensions based on binocular vision[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4):1054-1061. (in Chinese)
- [22] 张鹏炜,张智诠,胡磊,等. 一种用于外科手术导航的双目视觉简化系统[J]. 光电工程,2009,36(6):37-40.  
ZHANG P W, ZHANG ZH Q, HU L, *et al.*. A binocular vision simplified system for the surgical navigation[J]. *Opto-Electronic Eng.*, 2009, 36(6):37-40. (in Chinese)
- [23] 谢劲冰,胡磊,张鹏炜. 双目视觉技术在前交叉韧带重建手术导航系统中的应用[J]. 中国组织工程研究与临床康复,2008,12(59):10297-10300.  
XIE J B, HU L, ZHANG P W. Application of binocular vision technology in cruciate ligament surgical system[J]. *J. Clinical Rehabilitative Tissue Eng. Research*, 2008, 12(59):10297-10300. (in Chinese)
- [24] 田丰,汪浩,夏雪. 基于视觉的触控系统标定方法[J]. 液晶与显示,2013,28(4):561-566.  
TIAN F, WANG H, XIA X. Calibration method for vision-based touch system[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(4):561-566. (in Chinese)
- [25] 唐巍,叶东,袁峰,等. 灰色关联分析方法在双目视觉测量系统误差分析中的应用[J]. 光学精密工程,2013,21(2):503-513.  
TANG W, YE D, YUAN F, *et al.*. Grey incidence analytic method to error analysis of binocular vision measurement system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2):503-513. (in Chinese)
- [26] 黄新民,申静,任亚杰,等. 基于CRT显示器的人眼彩色视觉特性数学模型研究[J]. 液晶与显示,2013,28(3):365-372.  
HUANG X M, SHEN J, REN Y J, *et al.*. Research mathematical model of human color vision characteristics based on CRT display[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(3):365-372. (in Chinese)
- [27] 王晓红,刘太庆. 基于视觉灰平衡的LCD显示器色彩校正[J]. 液晶与显示,2013,28(6):868-871.  
WANG X H, LIU T Q. Color correction of LCD displays based on visual gray balance[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(6):868-871. (in Chinese)
- [28] 郭杰,雷刚,陈健生,等. 基于机器视觉的钢包头检测系统设计[J]. 液晶与显示,2013,28(5):770-775.  
GUO J, LEI G, CHEN J SH, *et al.*. Design of steel toecaps inspection system based on machine vision[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(5):770-775. (in Chinese)
- [29] 张来刚,魏仲慧,何昕,等. 多约束融合算法在多摄像机测量系统中的应用[J]. 液晶与显示,2013,28(4):608-614.  
ZHANG L G, WEO ZH H, HE X, *et al.*. Multi-camera measurement system based on multi-constraint fusion algorithm [J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(4):608-614. (in Chinese)

#### 作者简介:



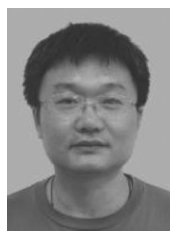
吕家国(1954—),男,河南镇平人,高级工程师,主要从事计算机视觉、指挥信息系统方面的研究。E-mail: zpwxb1119@126.com



张鹏炜(1975—),男,内蒙古乌兰察布人,博士后,工程师,1998年、2004年、2009年于装甲兵工程学院分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事计算机视觉、光电图像处理、光电检测方面的研究。E-mail: zhpw1119@163.com



蒋晓瑜(1967—),男,湖南安仁人,博士,教授,博士生导师,1994年于装甲兵工程学院获得硕士学位,1997年于北京理工大学获得博士学位,2000年于中国科学院遥感应用研究所博士后出站,主要从事目标探测与识别、信息光学技术方面的研究。E-mail: jiangxiaoyu\_2007@gmail.com



胡磊(1965—),男,湖北咸宁人,高级工程师,硕士生导师,1986年于北京航空航天大学获得学士学位,主要从事医疗机器人技术、智能医疗设备及骨科手术导航等方面的研究。E-mail: hulei9971@sina.com