

# 激光与光电子学进展

## 一种基于重建精度最优的多视点光学定位算法

叶灿<sup>1,2</sup>, 武博<sup>1,2</sup>, 杨巧玲<sup>1,2</sup>, 郝林佳<sup>1,2</sup>, 张楠<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>首都医科大学生物医学工程学院, 北京 100069;

<sup>2</sup>临床生物力学应用基础研究北京市重点实验室, 北京 100069

**摘要** 多视点光学定位系统因其可以减少手术中的定位盲区、获得更大的视野范围, 已成为弥补光学定位中光线遮挡弊端的一种有效解决方案。本文提出基于重建精度最优的多视点光学定位算法, 以解决光学定位中光线遮挡问题。算法首先通过分析各视点中光学定位标记物数量判断各视点与手术器械的光线遮挡情况; 然后根据平行式立体视觉测量精度分析模型, 分析平行式多视点的结构及标记物与相机之间的位置关系对三维测量精度的影响; 最后选择重建精度最优并且不存在遮挡的视点对手术器械定位。实验结果表明, 当存在某视点光线遮挡时, 所提算法能实现手术器械的精确定位和实时跟踪。

**关键词** 视觉光学; 建模; 多视点; 光学定位; 误差分析; 平行式立体视觉

中图分类号 R612

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1133001

## Multi-Viewpoint Optical Positioning Algorithm Based on Optimal Reconstruction Accuracy

Ye Can<sup>1,2</sup>, Wu Bo<sup>1,2</sup>, Yang Qiaoling<sup>1,2</sup>, Hao Linjia<sup>1,2</sup>, Zhang Nan<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Biomedical Engineering, Capital Medical University, Beijing 100069, China;

<sup>2</sup>Beijing Key Laboratory of Fundamental Research on Biomechanics in Clinical Application, Capital Medical University, Beijing 100069, China

**Abstract** Multi-viewpoint optical positioning system is an effective solution to make up for the disadvantages of light occlusion in optical positioning because it can reduce the blind area in the operation and obtain a larger field of vision. In this paper, multi-viewpoints optical positioning algorithm based on the optimal reconstruction accuracy is proposed to solve the problem of light occlusion in optical positioning. First, the proposed algorithm analyzes the number of optical positioning markers in each viewpoint to confirm the light occlusion of each viewpoint and surgical instrument. Then, according to parallel stereo vision measurement accuracy analysis model, the influence of the multi-viewpoints structure and the position relation between the marker and the camera on the measurement accuracy is analyzed. Finally, the viewpoint pair with the best reconstruction accuracy and no occlusion is selected surgical instruments. Experimental results indicate that the proposed algorithm can achieve accurate positioning and real-time tracking of surgical instruments when there is a certain view occlusion.

**Key words** visual optics; modeling; multi-viewpoint; optical positioning; error analysis; parallel stereo vision

**OCIS codes** 330.7326; 150.6044; 120.3890

收稿日期: 2020-09-09; 修回日期: 2020-09-19; 录用日期: 2020-09-30

基金项目: 国家自然科学基金 (61672362)、北京市自然科学基金 (4172012)

\*E-mail: zhangnan@ccmu.edu.cn

## 1 引言

手术导航系统对缩短手术时间、减小手术伤口、提高手术的精准度有重要意义,国内外的医生及研究者将手术导航应用在各种外科手术中<sup>[1-3]</sup>。手术导航系统的精度主要取决于空间定位系统获取患者和手术器械的空间位置的精度<sup>[4]</sup>,其中,光学定位是目前手术导航系统中定位精度最高的一种空间定位系统,精度可达到亚毫米级<sup>[5]</sup>。

国际上有许多光学定位系统,最具代表性的产品有加拿大 Northern Digital Inc (NDI) 公司的 Polaris Vega 系统<sup>[6]</sup>和美国 Stryker 公司的 Stryker NAV3i 系统<sup>[7]</sup>。除了这些商用的光学导航系统,很多国内外的大学及其他研究机构也致力于光学导航系统的研究。根据光学定位标记物的工作方式不同,主要分为三种,一种为主动式红外光学定位,Zhou 等<sup>[8]</sup>在手术器械上固定主动发光的红外二极管,采用立体摄像机,结合自主研发的图像处理方法和易于实现的三维空间跟踪算法,实现了高精度手术器械跟踪;第二种为被动式红外光学定位,NDI 公司的 Polaris Vega 系统<sup>[6]</sup>在手术器械上固定球形反光标记物,用于反射定位系统上照明器发出的红外光线,相机通过捕获标记反射的光,实现手术器械跟踪,这种定位方法的优点是手术器械不受电源线影响;第三种为可见光标记物光学定位,加拿大 ClaroNav 公司的 MicronTracker 系统<sup>[9]</sup>采用的是可见光成像方法,通过对黑白颜色的光学定位标记物的检测和追踪,实现对安装有这些特殊标记的手术器械跟踪。为了同时识别追踪多个手术器械,Wiles 等<sup>[10]</sup>设计了电源控制系统,每次激活一个标记物,得到的图像中只有一个点,从而准确地识别每一个标记物,实现多个手术器械的跟踪。Zhang 等<sup>[11]</sup>利用每个手术器械上标记形成的独特几何形状来识别不同器械,能快速识别多个手术器械。为了提高光学定位系统的精度,Cai 等<sup>[12]</sup>提出了一个实时视觉传输系统,精确控制光学系统输出数据流的时序,控制两个相机的同步触发。Sels 等<sup>[13]</sup>通过将标定所用的平面棋盘图改为计算机液晶屏显示的灰度编码,获得更准确的相机标定。

然而,这些应用于手术导航中的光学定位系统及算法均基于双目定位的研究,在实际应用中,存在手术器械与手术人员引起的光线遮挡,导致

光学定位系统丢失手术器械的位置信息,影响定位的情况出现。而多视点视觉是在双目视觉的基础上,增加一台或者多台相机,获得不同相机位置下物体的图像<sup>[14]</sup>,当多视点中一个或两个相机因遮挡而无法工作时,其他的相机仍然可以采集图像<sup>[15]</sup>,此外,多视点视觉还具有追踪范围大、适应复杂环境能力强等优点<sup>[16]</sup>。在无人驾驶<sup>[17]</sup>、机器人视觉导航<sup>[18]</sup>、视频监控<sup>[19]</sup>、无人机<sup>[20]</sup>、空天测绘<sup>[21]</sup>、三维姿态估计<sup>[22]</sup>、天文定位<sup>[23]</sup>等领域,多视点获得了广泛的应用。如果手术导航中的光学定位系统由多台相机组成,则可以减少手术中的定位盲区,获得更大的追踪范围,而且当部分相机存在遮挡时,整个定位系统仍然可以稳定地提供定位信息,这将提高手术导航在各种手术应用中的灵巧性。

本文采用一种基于最优视点选择的平行式多视点定位算法来解决光学定位中光线遮挡的弊端。首先判断各视点与手术器械的遮挡情况,然后根据相机之间的基线距离、光学定位标记物与相机之间的位置关系对测量精度的影响,选择多视点中两个重建精度最优的视点使用三角法重建标记物坐标,解决光学定位中存在的光线遮挡问题。

## 2 平行式多视点光学定位算法

本文提出的平行式多视点光学定位算法通过选择多相机中的两个视点使用双目三角法重建标记物的空间坐标。双目视觉系统比较成熟,能够稳定地获得较好的三维测量效果。而平行式双目视觉系统是双目视觉系统中一种比较理想的系统。在平行式视觉系统中,各相机的光心在一条水平线上,相机的光轴平行,成像平面共面。各相机获得的同一物点所成的像点在一条水平线上,这个特点减少了重建过程中的匹配运算量<sup>[24]</sup>。

在视点遮挡判断环节,用  $N$  个光学定位标记物定位一个手术器械。在光学定位过程中,如果视点中标记物点数等于  $N$ ,就认为该视点不存在遮挡;如果某一视点中的特征点数小于  $N$ ,就认为该视点被遮挡。

在确定各视点的遮挡情况之后,分析相机之间的距离、测量点与相机之间的位置关系对三维测量精度的影响<sup>[25]</sup>。图 1 所示为平行式立体视觉

测量精度分析模型, 两台相机 C1 和 C2 水平放置, 各相机的成像平面共面, 光轴平行, 光心在一条水平线上, 设其中左相机 C1 的光心为坐标原点, 两相机 C1 和 C2 光心的连线为  $x$  轴, 左相机的光轴为  $z$  轴。设空间中一测量点  $P$ , 在相机 C1 所在的成像平面坐标系的坐标为  $(X_1, Y_1)$ , 在相机 C2 所在的成像平面坐标系中的坐标为  $(X_2, Y_2)$ ,  $\omega_1$  是测量点  $P$  和光心的连线与相机 C1 光轴的夹角在  $xOz$  平面上的投影角,  $\omega_2$  是测量点  $P$  和光心的连线与相机 C2 光轴的夹角在  $xOz$  平面上的投影角。

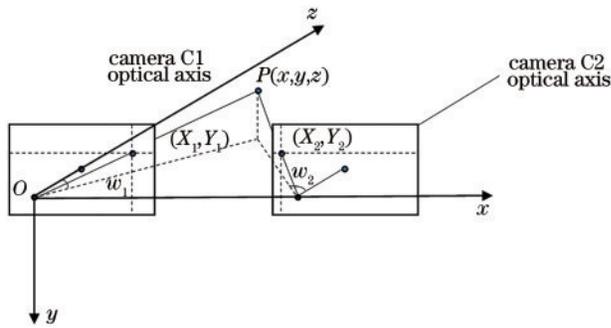


图 1 平行式立体视觉测量精度分析模型

Fig. 1 Parallel stereo vision measurement accuracy analysis model

由几何关系可以得到测量点  $P$  的空间三维坐标, 表示为

$$\begin{cases} x = \frac{B \tan \omega_1}{\tan \omega_1 + \tan \omega_2} \\ y = Y_1 \frac{z}{f_1} \\ z = \frac{B}{\tan \omega_1 + \tan \omega_2} \end{cases} \quad (1)$$

根据几何关系和(1)式可得  $x, z$  关于  $X_1, X_2$  的表达式, 表示为

$$\begin{cases} x = \frac{B \frac{X_1}{f_1}}{\frac{X_1}{f_1} - \frac{X_2}{f_2}} \\ z = \frac{B}{\frac{X_1}{f_1} - \frac{X_2}{f_2}} \end{cases} \quad (2)$$

为了分析立体视觉测量结构和测量点的空间位置对视觉测量精度的影响, 求  $x, z$  分别对  $X_1, X_2$  的偏导数, 可得

$$\begin{cases} \frac{\partial x}{\partial X_1} = \frac{z^2 \tan \omega_2}{B f_1} = \frac{z^2}{B f_1} \frac{B-x}{z} = \frac{z(B-x)}{B f_1} \\ \frac{\partial x}{\partial X_2} = \frac{z^2 \tan \omega_1}{B f_2} = \frac{z x}{B f_2} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial z}{\partial X_1} = -\frac{z^2}{B f_1} \\ \frac{\partial z}{\partial X_2} = \frac{z^2}{B f_2} \end{cases} \quad (4)$$

测量点  $P$  在  $z$  轴方向的测量误差为  $\Delta z$ , 在  $x$  轴方向的测量误差为  $\Delta x$ 。设两个相机在  $x$  轴方向的提取误差分别为  $\sigma_{x_1}, \sigma_{x_2}$ , 则测量点  $P$  在  $x$  轴、 $z$  轴方向的测量误差分别为

$$\begin{cases} \Delta x = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial X_1} \sigma_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial X_2} \sigma_{x_2}\right)^2} \\ \Delta z = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial X_1} \sigma_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial X_2} \sigma_{x_2}\right)^2} \end{cases} \quad (5)$$

将(3)、(4)式代入(5)式可得:

$$\begin{cases} \Delta x = \sqrt{\left(\frac{z(B-x)}{B f_1} \sigma_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{z x}{B f_2} \sigma_{x_2}\right)^2} \\ \Delta z = \sqrt{\left(\frac{z^2}{B f_1} \sigma_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{z^2}{B f_2} \sigma_{x_2}\right)^2} \end{cases} \quad (6)$$

在实际的平行式多视点定位中, 使用型号相同的相机, 理论上, 各个相机的焦距  $f$  相同, 提取精度  $\sigma_{x_1}$  和  $\sigma_{x_2}$  相同, 设为  $\sigma_x$ , 相机焦距固定。

$$\begin{cases} \Delta x = \sqrt{\left(\frac{z(B-x)}{B f} \sigma_x\right)^2 + \left(\frac{z x}{B f} \sigma_x\right)^2} = \frac{z \sigma_x}{f} \sqrt{1 - 2 \frac{x}{B} + 2 \left(\frac{x}{B}\right)^2} \\ \Delta z = \sqrt{\left(\frac{z^2}{B f} \sigma_x\right)^2 + \left(\frac{z^2}{B f} \sigma_x\right)^2} = \frac{\sqrt{2} z^2}{B f} \sigma_x \end{cases} \quad (7)$$

由(7)式可知, 相机的焦距固定, 测量同一深度距离  $z$  下的点,  $z$  轴方向的测量误差受相机间的基线距离  $B$  影响, 基线距离  $B$  越大, 测量误差  $\Delta z$  越小。

相机的焦距固定, 测量同一深度距离  $z$  下的点,

$x$  轴方向的测量误差受测量点与相机在水平方向的位置关系影响, 测量点在水平方向的位置越靠近两相机基线的中点,  $x$  轴方向的测量误差越小, 当测量点在水平方向的位置  $x$  位于两相机基线中点时,  $x$  轴

方向的测量误差最小。如果保持左相机的位置不变,测量点在水平方向的位置  $x$  不变,改变右相机的位置,从而改变基线距离  $B$ ,由(7)式可知,当基线距离  $B=2x$  时, $x$  轴方向的测量误差最小。

设测量点  $P$  的总体测量误差为

$$e = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta z^2} = \frac{z\sigma_X}{f} \sqrt{1 - 2\frac{x}{B} + 2\left(\frac{x}{B}\right)^2 + 2\left(\frac{z}{B}\right)^2} \quad (8)$$

在实际的双目光学定位过程中,一般不会改变相机间的基线距离,所以在实际测量时,测量误差  $e$

只与测量点的空间位置有关,测量点在  $z$  轴方向的距离越大,测量的误差  $e$  越大,测量点在  $x$  轴方向越偏离两相机基线的中点,测量的误差  $e$  越大。

在多视点测量中,不同视点间的基线距离不同,测量点与两视点在水平方向的距离不同,所以不同视点对重建测量点的误差也不同。在多视点测量过程中,选择测量误差  $e$  最小的两视点, $i$  代表不同双目视点,计算不同视点重建的总体测量误差  $e_i$  表示为

$$e_i = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta z^2} = \frac{z_i\sigma_X}{f} \sqrt{1 - 2\frac{x_i}{B_i} + 2\left(\frac{x_i}{B_i}\right)^2 + 2\left(\frac{z_i}{B_i}\right)^2}, \quad (i = 1, 2, \dots), \quad (9)$$

式中: $x_i$  是测量点在不同双目视点重建中与左视点的水平距离; $B_i$  是不同双目视点的基线距离; $z_i$  是测量点在不同双目视点重建中  $z$  轴方向的距离。在多视点测量过程中,选择使总体测量误差达到最小并且不存在遮挡的双目视点来重建测量点的三维坐标。

### 3 实验结果

本文通过搭建一套由 2 台 Bumblebee2 相机组成的平行式多视点定位系统,如图 2 所示,验证了所提算法在受到光线遮挡时定位手术器械的有效性。其中,每台 Bumblebee2 相机均为双目立体采集,即包含两个基线距离为 120 mm、平行式放置、焦距为 6 mm 的相机,相机的图像分辨率为 640 pixel×480 pixel,最大帧率为 20 frame/s,Bumblebee2 相机每个像素的物理尺寸长宽为 7.4 μm×7.4 μm。通过在相机前加红外滤波片以滤除自然光来捕获手术器械上安装的 3 个光学定位标记物的图像,其中,光学定位标记物为红外 LED 灯。平行式多视点定位算法可通过对光学定位标记物的定位测量,实现对手术器械的跟踪。

基于图 2 所示的平行式多视点光学定位系统,本文设计了手术器械跟踪实验。将手术器械放置在距相机大约 730 mm 处并不断移动手术器械,通过随机遮挡光学定位系统中一个视点,利用平行式多视点光学定位系统进行视频帧的捕获和器械的定位跟踪,其中共捕获 272 帧图像。

图 3 所示为光学定位系统各视点采集的图像,白点表示各视点捕获的手术器械上光学定位标志物的图像。根据各视点中标记物数量判断视点与手术器械之间遮挡情况,当视点中的光学定位标志物的图像不足 3 个,可以确定该视点与手术器械之



图 2 本课题组所使用的平行式多视点光学定位系统  
Fig. 2 Parallel multi-viewpoint optical positioning system of our research group

间存在遮挡,图 3(a)中第一幅图中标记物的图像不足 3 个,表示视点 1 与手术器械之间存在遮挡,同理,可以判断图 3(b)中的视点 2 存在遮挡、图 3(c)中的视点 3 存在遮挡、图 3(d)中的视点 4 存在遮挡。表 1 为跟踪过程中,各视点的遮挡情况。

表 1 各视点的遮挡情况  
Table 1 Occlusion of each view

Viewpoint	Video frame with occlusion
1	212-272
2	89, 98, 100, 106, 110, 142, 152
3	1-54, 205, 212, 227, 246
4	1-127

各个相机的内外部参数用张正友标定法获得。通过多个视点同步捕获公共区域黑白棋盘格的图像,根据黑白棋盘格的交叉点与各视点获得的图像点之间的对应关系,计算出各视点内部参数和各视点之间的相对位置关系。已知相机每个像素的物理尺寸长宽和视点的内部参数矩阵,可以计算出各视点的焦距,如表 2 所示,表中的  $f_i$  为不同视点的焦

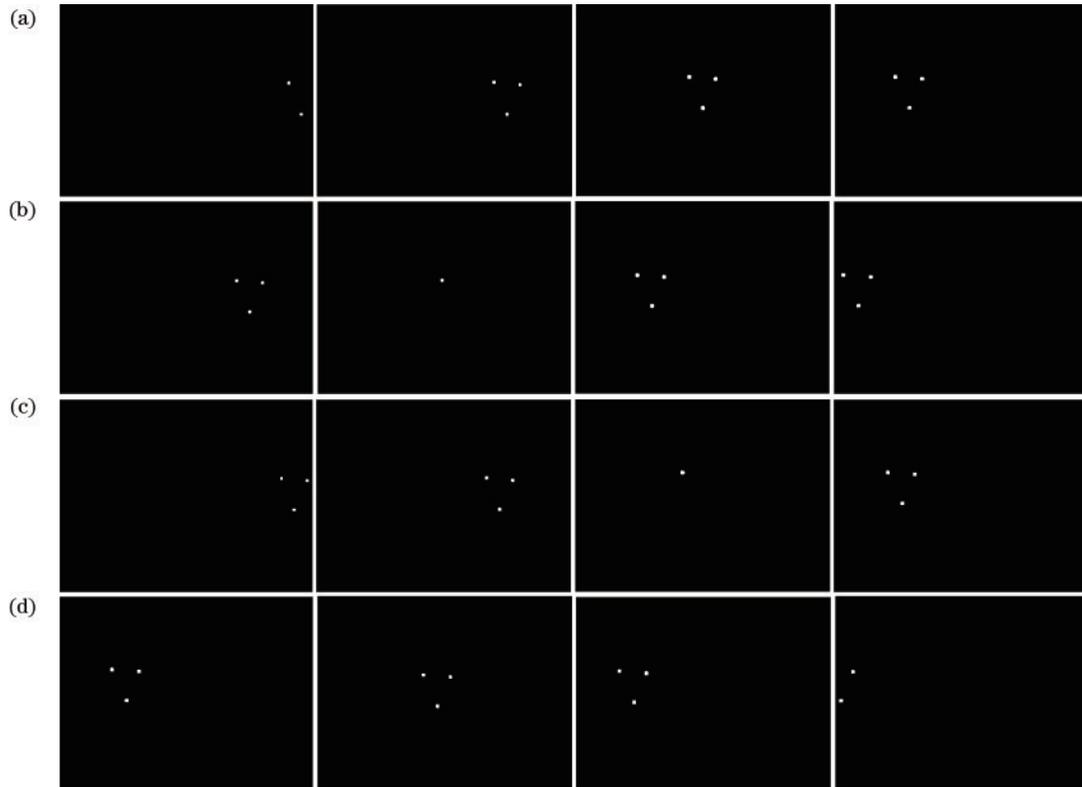


图 3 光学定位系统中不同视点存在遮挡情况时各视点采集的图像。(a)视点 1 存在遮挡;(b)视点 2 存在遮挡;(c)视点 3 存在遮挡;(d)视点 4 存在遮挡

Fig. 3 In the optical positioning system of our research group, images collected from each viewpoint when different viewpoints are occluded. (a) Occlusion at viewpoint 1; (b) occlusion at viewpoint 2; (c) occlusion at viewpoint 3; (d) occlusion at viewpoint 4

表 2 各视点的焦距

Table 2 Focus of each view unit: mm

Viewpoint	Focus $f_i$
1	6.009
2	6.027
3	6.003
4	6.053

表 3 不同双目视点之间的基线距离

Table 3 Baseline distance between different binocular viewpoints unit: mm

Binocular vision	Baseline distance between viewpoints $B_i$
1,2	119.5
1,3	249.6
1,4	369.5
2,3	130.2
2,4	250.1
3,4	120.0

距;各相机之间的相对位置关系包括视点之间的旋转矩阵和平移向量,通过平移向量可以得到不同视点之间的基线距离,表 3 为不同双目视点之间的基线距离。在前期的实验中<sup>[11]</sup>,获得大量的双目相机重建的手术器械尖端点在不同空间位置的坐标和重建精度的数据,基线距离通过张正友相机标定法获得,利用(8)式可以计算提取精度  $\sigma_x$ ,提取精度  $\sigma_x$  的平均值为 0.00024 mm。根据(9)式计算不同双目视点的总体测量误差,其中,  $x_i, z_i$  的值使用每个标记物前一帧的  $x$  方向坐标和  $z$  轴方向坐标,分别计算每一个标记物重建的测量误差,然后求平均值  $\bar{e}_i$ 。当双目视点中一个视点存在遮挡时,无法使用

这个双目视点进行定位,不用计算这个双目视点的总体测量误差,用横线表示,如表 4 所示。

从表 4 可以看出,手术器械在不同的位置,由不同视点获得手术器械上标记物的图像,不同的双目视点的总体测量误差的平均值不同,选择总体测量误差的平均值最小的视点对重建标记物的三维坐标。

图 4 所示为存在遮挡时,手术器械跟踪的结果,曲线代表使用本文算法重建出的目标手术器械的

表 4 不同双目视点的总体测量误差

Table 4 Total measurement errors of different binocular viewpoints

unit: mm

Frame No.	Average of total measurement errors of different binocular viewpoints $\bar{e}_i$						Reconstructed viewpoints
	1,2	1,3	1,4	2,3	2,4	3,4	
30	0.1133	—	—	—	—	—	1,2
60	0.1147	0.0532	—	0.1052	—	—	1,3
90	0.1150	0.0536	—	0.1060	—	—	1,3
120	0.1154	0.0538	—	0.1062	—	—	1,3
150	0.1169	0.0544	0.0363	0.1069	0.0547	0.1180	1,4
180	0.1204	0.0559	0.0373	0.1094	0.0559	0.1202	1,4
210	0.1247	0.0578	0.0384	0.1120	0.0574	0.1228	1,4
240	—	—	—	0.1209	0.0613	0.1304	2,4
270	—	—	—	0.1232	0.0634	0.1343	2,4

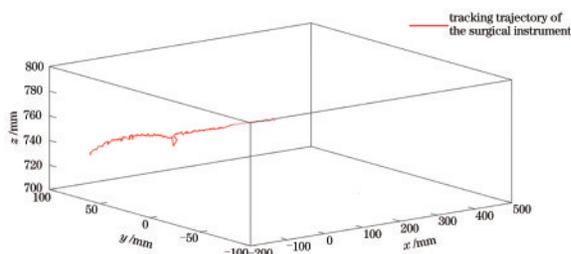


图 4 手术器械跟踪的结果

Fig. 4 Results of surgical instrument tracking

尖端运动轨迹。表 1 为跟踪过程中,各视点的遮挡情况,例如在 211 帧,四个视点都可以捕获手术器械上光学定位标志物的图像,多视点定位算法根据(9)式计算重建精度,选择重建精度最优的视点 1 和 4 对手术器械尖端点坐标进行重建;在 212 帧,视点 1 和 3 存在遮挡,此时,为了避免跟踪的间断,多视点定位系统选择视点 2 和 4 对目标手术器械进行追踪;在 213 帧,此时只有视点 1 存在遮挡,多视点定位算法根据重建精度最优选择视点 2 和 4 对目标手术器械进行追踪。实验结果表明,当存在遮挡时,使用本文所提的平行式多视点光学定位算法对手术器械进行定位是可行的。

## 4 结 论

本文提出基于重建精度最优的多视点光学定位算法,以解决光学定位中光线遮挡后无法定位的弊端。在多视点定位过程中,选择不存在遮挡并且重建精度最高的视点重建标记物的三维坐标,跟踪手术器械。由实验结果可知,当存在光线遮挡时,对手术器械进行实时跟踪是可行的。相对于基于双目定位的研究,本文所提多视点光学定位算法有助于提高手术导航的可靠性。考虑到实际手术中

可能出现的各种复杂的遮挡情况,本文所提多视点光学定位算法仍然有改进余地。下一步的工作重点为针对实际手术中出现的各种不同的遮挡情况,改进算法以适应实际手术环境的应用。

## 参 考 文 献

- [1] Meola A, Cutolo F, Carbone M, et al. Augmented reality in neurosurgery: a systematic review[J]. Neurosurgical Review, 2017, 40(4): 537-548.
- [2] Lehner M, Wendling-Keim D, Kunz M, et al. On-site CAD templates reduce surgery time for complex craniostenosis repair in infants: a new method [J]. Child's Nervous System, 2020, 36(4): 793-801.
- [3] van den Bempt M, Liebrechts J, Maal T, et al. Toward a higher accuracy in orthognathic surgery by using intraoperative computer navigation, 3D surgical guides, and/or customized osteosynthesis plates: a systematic review [J]. Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery, 2018, 46(12): 2108-2119.
- [4] Balter M L, Chen A I, Maguire T J, et al. Adaptive kinematic control of a robotic venipuncture device based on stereo vision, ultrasound, and force guidance[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(2): 1626-1635.
- [5] Rhee S J, Park S H, Cho H M, et al. Comparison of precision between optical and electromagnetic navigation systems in total knee arthroplasty [J]. Knee Surgery & Related Research, 2014, 26(4): 214-221.
- [6] Northern Digital Inc. NDI products [EB/OL]. [2020-07-27]. <https://www.ndigital.com/m-medical/products/polaris-vega>.

- [7] IncStryker. Stryke navigation system [EB/OL]. [2020-07-27]. <https://www.stryker.com/us/en/navigation/products/nav3i.html>.
- [8] Zhou Z T, Wu B, Duan J, et al. Optical surgical instrument tracking system based on the principle of stereo vision[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2017, 22(6): 065005.
- [9] IncClaroNav. Micron tracker [EB/OL]. [2020-07-27]. <https://www.claronav.com/navix/>.
- [10] Wiles A D, Thompson D G, Frantz D D. Accuracy assessment and interpretation for optical tracking systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5367: 421-432.
- [11] Zhang M S, Wu B, Ye C, et al. Multiple instruments motion trajectory tracking in optical surgical navigation [J]. *Optics Express*, 2019, 27(11): 15827-15845.
- [12] Cai K, Yang R Q, Chen H Z, et al. Synchronization design and error analysis of near-infrared cameras in surgical navigation[J]. *Journal of Medical Systems*, 2015, 40(1): 1-8.
- [13] Sels S, Ribbens B, Vanlanduit S, et al. Camera calibration using gray code [J]. *Sensors*, 2019, 19(2): 246.
- [14] Zheng T X, Huang S, Li Y F, et al. Key techniques for vision based 3D reconstruction: a review [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(4): 631-652.  
郑太雄, 黄帅, 李永福, 等. 基于视觉的三维重建关键技术研究综述 [J]. *自动化学报*, 2020, 46(4): 631-652.
- [15] Caroline B, Zisserman A. A plane-sweep strategy for the 3D reconstruction of buildings from multiple images [C]//*Proceedings of 2000 International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, September 3, 2000, Amsterdam, Netherlands. Amsterdam: ISPRS, 2000, 33: 56-62.
- [16] Liu B W, Yang L H, Niu Z Y, et al. High-precision autonomous positioning method of multi-camera system based on graph optimization [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(3): 031202.  
刘博文, 杨凌辉, 牛志远, 等. 基于图优化的多相机系统高精度自主定位方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(3): 031202.
- [17] Zhang Y, Lin Y P. An interactive method for identifying the stay points of the trajectory of moving objects [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2019, 59: 387-392.
- [18] Cheng L B, Jiang Z H, Li H, et al. Target-tools recognition method based on an image feature library for space station cabin service robots [J]. *Robotica*, 2016, 34(4): 925-941.
- [19] Meng J, Zhao X M. Human body recognition and positioning with multiple cameras based on "vibration signals" from skin surfaces [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0515001.  
孟潜, 赵夕朦. 基于皮肤表面“振动信号”的多摄像头人体识别定位 [J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0515001.
- [20] Yu R, Yang Y, Yang K. Small UAV based multi-viewpoint image registration for extracting the information of cultivated land in the hills and mountains [C]//*2018 26th International Conference on Geoinformatics*, June 28-30, 2018, Kunming, China. New York: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [21] Liu Z M, Zhang X F, Kuang H P, et al. Target location based on stereo imaging of airborne electro-optical camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1112003.  
刘志明, 张雪菲, 匡海鹏, 等. 基于立体成像机载光电相机的目标定位 [J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1112003.
- [22] Gilbert A, Trumble M, Malleson C, et al. Fusing visual and inertial sensors with semantics for 3D human pose estimation [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2019, 127(4): 381-397.
- [23] Yang B, Li Y C, Zhang T H. Application of camera array in initial orbit determination of space targets [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(2): 0204002.  
杨彪, 李迎春, 张廷华. 相机阵列在空间目标初轨确定中的应用 [J]. *光学学报*, 2019, 39(2): 0204002.
- [24] Wan Z L, Qi F, Liu Y T, et al. Reduced reference stereoscopic image quality assessment based on entropy of classified primitives [C]//*2017 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*, July 10-14, 2017, Hong Kong, China. New York: IEEE Press, 2017: 73-78.
- [25] Zhang G J. *Vision measurement* [M]. Beijing: Science Press, 2008: 137-139.  
张广军. *视觉测量* [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 137-139.