

多视角光学定位跟踪系统

刘伟^{1,3} 胡超^{1,2} 李抱朴¹ 宋霜^{1,3} 孟庆虎^{1,4}

¹ (中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

² (浙江大学宁波理工学院 宁波 315100)

³ (中国科学院大学 北京 100864)

⁴ (香港中文大学 香港)

摘要 本文提出了一种新型多目光学定位跟踪系统。该系统的硬件包含近红外照明电路、近红外被动发射式标靶和多视角摄像机阵列三部分；定位跟踪算法分成特征检测、特征点匹配、三维点重构和器械识别四个部分。Matlab仿真实验和系统实验验证了定位跟踪硬件系统和定位跟踪算法的有效性，相比传统的MinDis和MinPro算法，本文提出的基于异面直线的垂足加权算法具有更高的定位精度。

Multi-view Optical Tracking System

LIU Wei^{1,3} HU Chao^{1,2} LI Bao-pu¹ SONG Shuang^{1,3} MENG Qing-hu^{1,4}

¹ (Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

² (Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China)

³ (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China)

⁴ (The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China)

Abstract This paper proposes a multi-ocular localization and tracking system, which consists of three parts, near-infrared illuminating circuits, tracking tools with passive retro-reflective markers and multiple-camera array. The localization algorithm covers feature detection, point correspondence, 3D point reconstruction and target recognition. The validation and performance of the proposed system and algorithms have been proved by the simulated experiments and real-data experiments.

1 引言

定位跟踪技术是机器人领域重要技术之一，它利用不同传感方法确定目标的位置信息。基于成像技术定位的进行定位跟踪方法是常用方法之一。成像系统是对不同波段电磁波以影像方式获取并记录对象颜色、形貌和位置等信息的系统的总称。广义的光学成像包含了可见光波段、红外波段、荧光（通常是紫外或X射线波段）以及太赫兹波段等。定位跟踪领域的光学成像系统一般狭义地包含可见光和近红外两电磁波段。可见光波段成像系统是应用最广泛的成像系统

之一，其主要特点是使用方便、价格低廉；并且由于其“可见”性，因此，适合人类肉眼观测评估。加拿大Claron公司的Micron Tracker系列光学定位跟踪系统采用的是可见光波段成像方法，对黑白颜色的棋盘格特征标靶定位跟踪^[1]。该系统在最好情况下的标定精度可以达到0.20 mm RMS。不过，可见光波段光学定位跟踪系统易受环境光干扰，较难保证不同工作环境下测量精度的一致性。因此，对于鲁棒性要求更高的应用（如手术导航，机器人定位等），更多地采用近红外波段的光学定位跟踪系统。加拿大NDI公司的Polaris系列产品、德国ART公司ARTTRACK系列产品都属于近红外波段光学定位跟踪系统^[2,3]。前者被广泛

基金项目：国家自然科学基金项目资助（编号：61273332）

作者简介：刘伟，助理研究员，主要研究方向为手术机器人定位跟踪、计算机视觉和嵌入式系统；胡超，研究员，教授，研究方向为生物医学电子、传感器信息融合、机器人控制、图象处理和计算机视觉、光学与颜色测量、微计算机测控系统；李抱朴，中国科学院深圳先进技术研究院智能传感中心副主任，研究方向为图像处理、胶囊内窥镜系统；宋霜，博士研究生，研究方向为定位技术与算法；孟庆虎，教授，IEEE院士，研究方向为生物医学工程、医用机器人、交互式远程医疗、生物传感器、生物信息学和自适应智能系统、计算机视觉等。

应用于手术导航和机器人辅助手术领域；后者则主要应用于运动捕捉和工业测量等领域。

近红外波段光学定位跟踪系统依据标靶工作方式不同，可分为主动式光学定位系统和被动式光学定位系统。前者采用能自主发射近红外波长光信号的标记点作为光学定位跟踪的特征点，无需近红外照明系统提供光源环境。主动式光学定位跟踪系统的最大优势在于通过预先设定的发光模式（如频闪模式），在图像处理过程中可以较为准确地识别特征点，并确定平面图像坐标。不过主动发光的标靶需要额外电源支持。加拿大NDI公司的主动式光学标靶采用导线供电技术，驱动标靶的红外LED以给定模态发光。不过导线也使标靶的移动和操作受到一定限制。因此，有的主动式光学定位跟踪系统采用电池供电技术解决这一问题。但是，由于驱动电路复杂度增加，以及电池更换等因素，也给这类主动光学定位跟踪系统的使用带来了不方便。

被动式光学定位跟踪系统利用光学反射方法，在标记球上附着近红外波长反射材料，增强标记球对照明近红外光的反射能力，从而达到图像中标记球与周围环境明显区分的目的。被动式光学定位跟踪系统在使用便利性方面明显优于主动式光学系统。文献[4]利用三坐标测量仪的位置真实值，对主动式和被动式两种光学标靶系统在相同工作条件下进行了比对实验。结果证明两种系统在定位精度方面没有明显差别。消除了“主动式光学系统定位精度优于被动式系统”的普遍误解。因此，从实用性和定位精度两方面考虑，我们采用了被动反射式光学标靶作为系统定位跟踪的对象。

视线遮挡(Loss of Sight)是光学定位跟踪系统最常见的工作失效原因之一。近红外光学定位跟踪系统中，当来自主动式光学发光标记点，或者被动反射式光学标记球的红外光线被用户或物体遮挡时，空间点三维重构由于缺少必要的二维图像中的特征点间对应信息，容易导致定位跟踪失败。多视角光学系统是减轻视线遮挡的有效的手段之一。对于静态物体三维定位重构，通常利用单摄像机在不同视角所拍摄的图像间提取匹配特征点，通过摄像机极几何(Epipolar Geometry)关系对特征点进行三维重构。Takeo Kanade等人[5]提出的Shape from Motion(SFM)方法是这一类算法的典型代表。SFM及其演化算法被广泛应用于物体形貌的三维重构领域。对于运动物体的定位跟踪，通常采用两个或者两个以上摄像机，在同一时刻拍摄跟踪目标。通过提取摄像机图像间对应特征

点，计算跟踪目标的空间位置和姿态信息。多摄像机定位跟踪系统的优势在于可以实时计算目标的空间位置和姿态。同时由于多信息冗余情况存在，系统的定位精度可以明显提高。

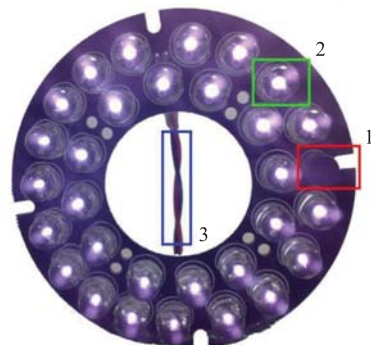
尽管，目前已有多种商用的光学定位跟踪系统，不过因为商用系统的封闭性，这类系统只能直接输出标靶的最终三维坐标及姿态，无法从系统硬件及定位算法本身加以改进。因此我们研制了多目光学定位跟踪系统，并在此系统上实验了多种定位跟踪算法。本文第二部分将介绍我们研制的多视角光学定位跟踪系统的硬件构成，包含近红外照明电路、近红外被动发射式标靶和多视角摄像机阵列三部分；第三部分介绍了多相机定位跟踪系统算法，包括特征检测、特征点匹配、三维点重构和器械识别四个子算法。第四部分则通过Matlab仿真实验和系统实验验证了系统硬件和定位算法的有效性及其精度。文章第五部分将全文进行总结。

2 系统构成

我们设计的多视角光学定位跟踪系统硬件部分主要由三部分组成：近红外照明电路、近红外被动发射式标靶和多视角摄像机阵列。下面分别对这三部分展开介绍。

2.1 近红外照明电路

近红外波段较好地避开如室内灯光和日光等诸多变化环境影响，有益于提高特征提取算法精度和鲁棒性。由于系统采用被动反射式标靶设计（见下节），我们设计并制作了850 nm近红外波段的照明电路。



1) 环境光检测 2) 850 nm红外LED 3) 12 V直流电源线
图1 近红外照明电路

如图1近红外照明电路由两部分组成：近红外发光管驱动和环境光检测。我们采用30个直径8 mm的发光主波长为850 nm的近红外发光管，组成环形发光阵列；该照明电路的驱动电压设计为直流12 V。此外，在电路一侧设计了红外光检测模块。该模块以光伏转

换形式, 将环境中的近红外光光照强度信息转换成电压信号, 然后输出至系统的AD采集模块。系统依据接采集到的电压值判定当前工作环境中的光照情况, 自适应地调整前述近红外照明模块输出亮度。

2.2 反射式标靶

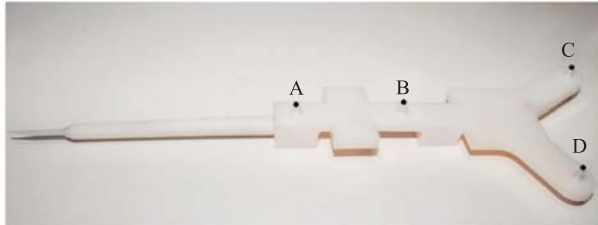


图2 光学定位跟踪标靶

图2显示了我们利用Solidworks软件设计并三维打印出来的定位标靶。标靶材质为对近红外低反射的ABS材料, 目的是为了突出红外反射球在图像中的特征。四个对850 nm波长反射能力强烈的小球被安装固定在标靶的设定位置。我们使用STRATASYS公司的uPrint三维打印机精度为0.2 mm, 确保四个红外反射球被固定安装于同一平面。实际使用过程中, 以A球球心为原点, 建立标靶坐标系 F_{tar} 。 x - y 平面定义为四个反射球所共的同一平面; 共面误差为0.2 mm。坐标系 F_{tar} 的 z 轴为利用右手法则定义为 x - y 平面的垂直方向。我们设计的标靶采用了如下模式:

$$\text{Mod} = \{\text{Mtar}(0,0);(40, 0);(100, 20);(100, -30)\}$$

()中数值为对应反射球在坐标系 F_{tar} 的 x - y 平面坐标, 单位为毫米。后面将利用这一模态对已重构的三维特征点分类识别。

2.3 多视角摄像机阵列

我们设计的多摄像机阵列采用四个130万像素的CCD摄像机, 通过IEEE 1394标准接口连接至PC机的1394信号采集卡。此外, 多摄像机定位跟踪系统一项重要技术是同步拍摄。只有保证足够的同步图像采集精度, 才有可能实现高定度的运动物体定位跟踪性能。文献[6]提出通过算法估计补偿不同摄像机拍摄图像间的特征点匹配误差。而本实验系统则采用硬件同步触发方法来实现不同摄像机同步拍摄控制。我们采用的德国映美精公司的DMK 41BF02单色CCD相机带有硬触发拍摄控制接口。系统输出触发电平后, 四个摄像机将同时对同一场景曝光, 确保不同摄像机图像记录的是同一空间位置的定位跟踪目标。

值得一提的是, 为了去除非850 nm波长的环境光对成像系统的影响, 我们在每个摄像机镜头前方加装了850 nm半波长为50 nm带宽的高性能窄带滤光片。该

滤光片能较好地配合系统的850 nm近红外照明系统。

3 算法构成

接下来我们将从算法层面对多视角光学定位跟踪系统展开讨论。如图3所示, 光学定位跟踪算法主要分成特征检测、特征点匹配、三维点重构和标靶识别四个步骤。下面对这四部分展开详细介绍。



图3 定位跟踪算法组成部分

3.1 特征检测

我们采用对近红外波长光线有很强反射能力的小球作为定位跟踪目标的标记点。因此, 图像中标记球区域亮度会明显高于环境亮度。设灰度图像中亮度值大于 T_b 的像素区域为“种子”(在我们的实验系统中, 设定 T_b 为40), 通过区域生长法, 求得标记球球心在图像投影中的位置坐标 (x_b^i, y_b^i) (i 代表不同标记球的序号)。

我们在传统的区域生长法基础上, 加入了结合光学定位跟踪特点的几何约束。假定已知标记球直径为 d , 定位跟踪工作空间距离为 $z_{min}^j \sim z_{max}^j$, j 代表摄像机的序号; z_{min}^j 表示离摄像机 j 最近的工作距离; z_{max}^j 代表离摄像机 j 最远的工作距离。若摄像机 j 的尺度因子为 α_j , 且通过摄像机内外参数标定^[7,8]可以得到摄像机 j 的焦距 f_j 。则公式(1)说明了实际应用中的几何约束:

$$\frac{dz_{max}^j}{\alpha_j f_j} \leq W_b^j \leq \frac{dz_{min}^j}{\alpha_j f_j} \quad (1)$$

W_b^j 即标记球在摄像机 j 拍摄图像中的投影直径范围。实际系统中以 W_b^j 为限定条件, 对区域生长算法加以约束。

3.2 特征点匹配

特征点匹配问题是定位跟踪领域关键技术问题之一。在双目视觉系统中, 常用的特征点匹配方法是沿着成像点对应极线, 在相应邻域搜索灰度或几何特征相关候选点^[9]。而在多目视觉系统中, 则通过两条或两条以上相交极线约束方法, 实现特征点匹配^[10,11]。但是这些匹配算法易受噪声干扰影响, 且几何意义不明显。

我们利用极几何(Epipolar Geometry)中的基础矩阵(Fundamental Matrix)概念对不同视角像平面中的已检测出的特征点进行匹配。理想情况下有如下

等式

$$m'^T F m = 0 \quad (2)$$

其中, m' 和 m 分别代表两个不同视角像平面中特征点的齐次平面坐标(Homogenous Coordinates), F 是摄像机间的基础矩阵。基础矩阵是计算机视觉技术的基础概念之一, 可以通过预先标定技术, 或者最优化方法估计得到。基础矩阵的估计方法不属于本文讨论范围在此, 不做过多论述。

以上介绍了基础矩阵与成像对应点(Point Pair)间的关系, 那么, 即可以此代数约束关系逆向寻找不同成像平面上特征点的对应关系(Point Correspondence)。不过, 由于实际光学系统中存在噪声, 对应点与基础矩阵不一定满足(2)。本文设计了一个基于公式(2)提出了一种基于代数和最小的点匹配方法, 如(3)所示:

$$(i,j)_1^N \rightarrow \operatorname{argmin} \sum_{i \neq j}^N (m_j'^T F m_i)^2 \quad (3)$$

其中 i,j 分别代表两个摄像机中 N 个特征点的序号, $(i,j)_1^N$ 代表最终 N 个特征点匹配结果。该方法好处在于在系统存在误差的条件下, 也可以进行特征点间的最优化匹配。本文实验部分将给出该方法的有效性测试结果。

3.3 三维点重构

空间点三维重构是计算机视觉研究的核心问题之一。它主要讨论如何从图像点恢复与它对应的空间点在世界坐标系中的坐标问题。双目视觉系统中, 三角法重构是最常用的算法之一^[12]。然而, 这一算法不能直接应用于多相机系统三维重构。许多研究组对此问题展开了广泛研究。主要方法分成以下三类: 一是Hartley等人提出的基于最小二乘法(LSM)的代数方法^[13]。另一类是反投影误差最小法^[14]。一般采用Bundle Adjustment(BA)技术, 以LSM解为初值进行最优化求解。第三类方法则以反投影的最短距离为代价函数(MinDis), 通过循环迭代的方法求出最优的空间重构点位置^[15]。不过, MinPro和MinDis等算法由于需要迭代复杂的迭代运算, 因此算法运算速度相对较慢。为了解决这一问题, 我们提出了一种多视角视觉系统中基于异面直线垂足的三维点重构算法^[16]。

以四目摄像系统为例, 如图4所示, M 是一空间点, q_1, q_2, q_3, q_4 是理想情况下(无环境干扰、成像误差等影响), 空间点 M 在四个摄像机平面的投影。 O_1, O_2, O_3, O_4 分别是四个摄像机的投影中心。可是由于实际系统中存在如环境光干扰、图像传感器成像

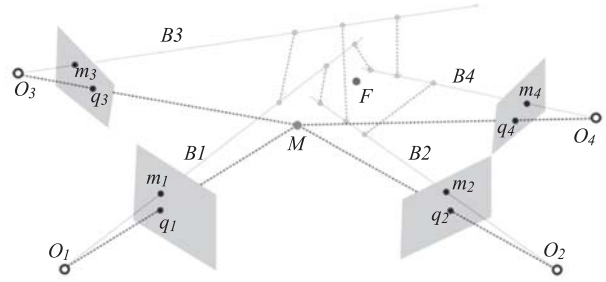


图4 基于异面直线垂足的空间定位算法

误差以及镜头误差等因素, 不同摄像机中投影点和理想投影点之间会存在误差。以表示 m_1, m_2, m_3, m_4 空间点 M 在四个摄像机平面的实际投影位置。如图4所示, 连接投影中心 O_i 和 m_i 的反投影线一般不会汇聚在空间点的实际位置 M , 往往这些反投影线会构成空间异面直线组。我们提出的垂足法首先计算两两异面直线间的垂足点的空间位置, 然后对所有垂足点加权平均即可求得空间点 M 的测量值。具体算法如下:

由空间摄影几何知识可得, 反投影线方程可表达为:

$$\lambda L + S \quad (4)$$

其中, L 是反投影线的方向矢量, 可以表达为 $L=R^T A^{-1}(uv1)^T$, R 和 A 分别为摄像机的旋转矩阵和内参数矩阵; λ 是任意非零实数; $S=-R^T t$ 是摄像机投影中心在世界坐标系中的坐标, 其中, t 代表摄像机在世界坐标系中的平移矩阵。基于反投影线方程公式(4), 反投影线 i 和 j 之间的垂足 F_{ij} 和 F_{ji} 可以表达为如下:

$$\begin{cases} a = \langle L_i, L_i \rangle \\ b = \langle L_j, L_j \rangle \\ c = \langle L_i, L_j \rangle \\ d = \langle L_i, S_j - S_i \rangle \\ e = \langle L_j, S_j - S_i \rangle \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lambda_i = \frac{bd + ce}{c^2 - ab} \\ \lambda_j = \frac{cd + ae}{c^2 - ab} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} F_{ij} = S_i + \lambda_i L_i \\ F_{ji} = S_j + \lambda_j L_j \end{cases} \quad (5)$$

基于反投影线间的垂足点坐标, 通过公式(6)加权平均算法即可求出空间点的三维坐标测量值。

$$\begin{cases} X = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n (\omega_{x-ij} \cdot X_{ij}) \\ Y = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n (\omega_{y-ij} \cdot Y_{ij}) \\ Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n (\omega_{z-ij} \cdot Z_{ij}) \end{cases} \quad (6)$$

其中, n 代表多目视觉系统中摄像机数目; $(X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij})^T$ 是垂足 F_{ij} 的三维空间坐标; $(\omega_{x-ij}, \omega_{y-ij}, \omega_{z-ij})$ 代表垂足 F_{ij} 的三个坐标轴方向的加权值^[17]。该算法的定位精度分析请参考本文第四部分。

3.4 器械/标靶识别

被动反射式光学定位跟踪系统常用3个或者3个以

上的特征标记球组成一个跟踪器械/标靶, 然后将标靶固定在刚性(rigid)对象(如手术器械)上来计算跟踪对象刚体的位置和姿态。若系统中存在两个或者两个以上的器械/标靶, 则需要对不同标目标行识别。本文以同一平面4球为例, 通过球-球间距离矩阵来识别器械标靶。

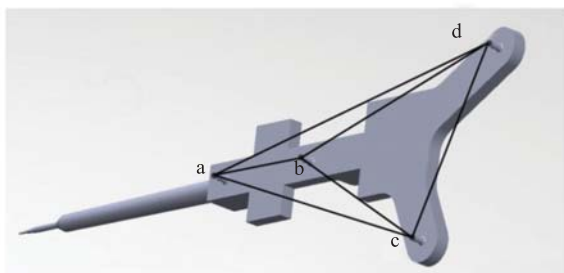


图5 标靶模式示意图

如图5, 若某设计标靶以球 a 为参考点, 则该标靶特征描述为距离矩阵 D_{tar} (后称标靶 D_{tar}),

$$D_{tar} = \begin{bmatrix} 0 & d_{ab} & d_{ac} & d_{ad} \\ d_{ab} & 0 & d_{bc} & d_{bd} \\ d_{ac} & d_{ac} & 0 & d_{cd} \\ d_{ad} & d_{bd} & d_{cd} & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

距离矩阵 D_{tar} 的子项是该标靶中球与球间的距离。

若实际系统中应用的标记球个数为 N 个, 通过空间点三维重构算法求出 N 个标记球的三维空间位置坐标以后, 可以利用如下算法识别出标靶 D_{tar} :

步骤一: 计算全部 N 个标记球间的距离矩阵 $\Gamma_{N \times N}$;

步骤二: 在矩阵 $\Gamma_{N \times N}$ 中搜索任意不共行且不共列四个元素组成候选矩阵 d_{tar} ;

步骤三: 计算矩阵 d_{tar} 与矩阵 D_{tar} 的距离, 若误差小于给定阈值 δ , 则步骤二搜索到的四个球即为目标标靶。

4 仿真及系统实验

4.1 仿真实验

前面的三维点重构算法部分, 提到了通过垂足点加权平均法, 求解空间三维点坐标的方法。这一部分我们将对三种不同权值确定方法进行仿真验证。这三种加权平均的方法分别是:

(1) 均值加权(PFU)

均值加权及所有垂足具有相同权重, 那么加权系数可以表示为:

$$\omega_{x-ij} = \omega_{y-ij} = \omega_{z-ij} = \frac{1}{n(n-1)} \quad (8)$$

其中代表反投影线数目, $i, j=1, 2, 3, \dots, n$, 且 $i \neq j$ 。

(2) 误差加权(PFE)

研究空间点三维重建坐标 $(X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij})^T$ 与其在不同摄像平面投影的误差之间关系, 可以通过如下的偏导数实现。由于重建坐标三个分量相互独立, 因此这里以 X 方向为例:

$$\frac{\partial X}{\partial u_k} = \sum_{i=1, i \neq k}^n (\omega_{x-ki} \cdot \frac{\partial X_{ki}}{\partial u_k}) + \sum_{i=1, i \neq k}^n (\omega_{x-ik} \cdot \frac{\partial X_{ik}}{\partial u_k}) \quad (9)$$

$$\frac{\partial X}{\partial v_k} = \sum_{i=1, i \neq k}^n (\omega_{x-ki} \cdot \frac{\partial X_{ki}}{\partial v_k}) + \sum_{i=1, i \neq k}^n (\omega_{x-ik} \cdot \frac{\partial X_{ik}}{\partial v_k})$$

(u_k, v_k) 表示空简单在第 k 个摄像平面中投影坐标。一般地, 摄像平面投影坐标两方向相互独立, 因此, 由像坐标误差引起的空间点位置 X 方向的误差可表达为:

$$\text{Err}(X) = \left(\frac{\partial X}{\partial u_k}\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial v_k}\right)^2 \quad (10)$$

这里, 我们以

$$\omega_{x-ij} = \frac{1}{n-1} W_i, \text{ 其中 } W_i = \frac{e_i}{\sum_{k=1}^n e_k}, e_i = \frac{1}{\sqrt{\text{Err}(X)}} \quad (11)$$

为 X 方向的权值, 同理, 求出 Y 及 Z 方向的权值, 对垂足进行加权平均。

(3) 距离加权(PFD)

首先, 利用均值加权方法求得空间点的三维坐标 F ; 计算三维坐标 F 到每个摄像中心 O_i 的欧式距离 $d_i = \|O_i - F\|$ 。

然后, 计算相应反投影线权重

$$W_i = \frac{D_i}{\sum_{k=1}^n D_k}, \text{ 其中 } D_i = \frac{1}{d_i} \quad (12)$$

最后, 求得 X, Y, Z 三个方向的权值,

$$\omega_{x-ij} = \omega_{y-ij} = \omega_{z-ij} = \frac{1}{n-1} W_i \quad (13)$$

在Matlab2008软件环境中, 我们通过如下方法对以上三种不同权值方法进行仿真实验, 具体步骤

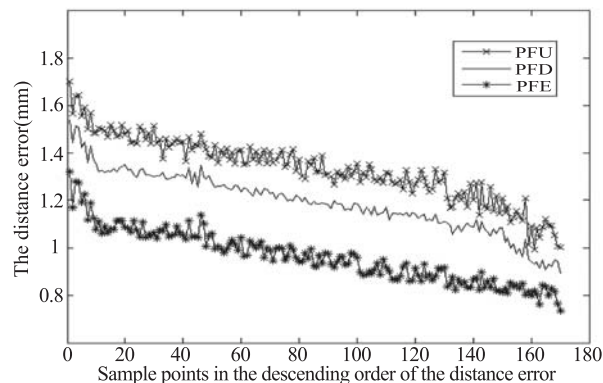


图6 PFU、PFD及PFE定位算法仿真结果

如下:

步骤一: 给定一已知位置的空间三维点坐标, 及摄像机内外参数矩阵;

步骤二: 利用针孔成像模型生成170个不同噪声的二维投影点;

步骤三: 分别利用PFU、PFE和PFD三种不同权值计算空间三维点坐标;

步骤四: 计算三种方法的RMS重构误差。

由以上仿真实验可以看出, 均值加权法和距离加权法具有相近的误差等级; 不过, 均值加权法的波动性大于基于距离的加权算法。基于成像坐标误差(PFE)的三维点重构方法, 相对其他两种方法有较小的重构误差。

4.2 系统实验

这一部分, 我们首先对点匹配算法进行验证。如图7所示, 两幅不同视角摄像机拍摄的图像中四个特

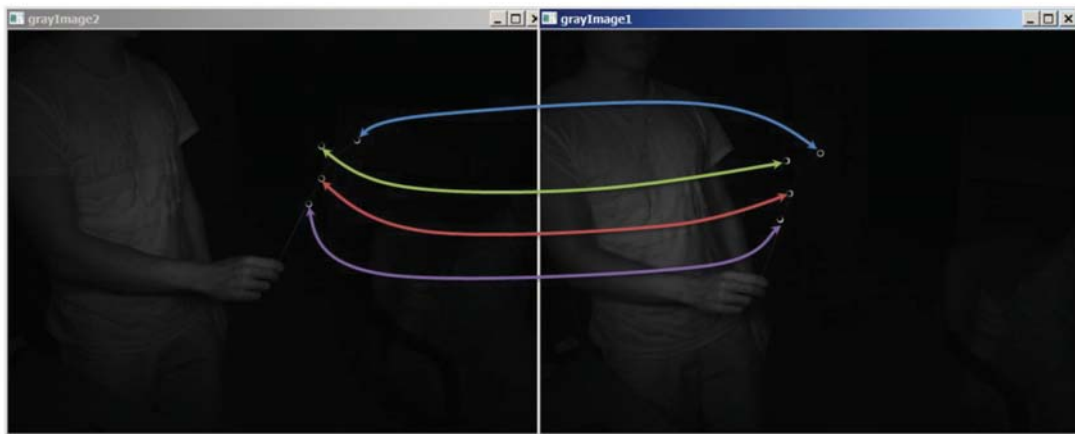


图7 点匹配算法实验结果

征点通过本文第三部分“基于基础矩阵的代数和最小的点匹配方法”得出了正确的点匹配结果。具体实验

数据如表一所示。

表1 图7状态下两成像平面中特征点间基础矩阵算式实验数据结果

| 摄像机 1 \ 摄像机 2 | 特征点 1 | 特征点 2 | 特征点 3 | 特征点 4 |
|---------------|--------|--------|--------|--------|
| 特征点 1 | 3517 | 115855 | 264329 | 414477 |
| 特征点 2 | 122031 | 4768 | 143254 | 292304 |
| 特征点 3 | 269993 | 153540 | 3814 | 146159 |
| 特征点 4 | 420056 | 304945 | 154138 | 3885 |

由图7和表一数据可以看出, (1, 1), (2, 2), (3, 3)和(4, 4)点对应时, 利用公式(3)求得的数值最小, 因此匹配正确。同时, 也注意到在匹配正确情况下, 由于利用公式(3)求得的数值非零, 也证明了系统中误差存在。

我们还利用自制的四目定位跟踪光学系统, 对本文第三部分提出的各种算法编码实现, 并做了相关系统实验。如图8所示, 红外光学反射小球被固定在三坐标测量仪(CMM)的移动探头上。CMM的移动RMS精度为0.005 mm。光学定位跟踪系统的内外参数通过^[7]方法标定得到。实际实验中, 光学反射小球被CMM探头

带着移动至给定精确位置, 这些精确位置被设定为实

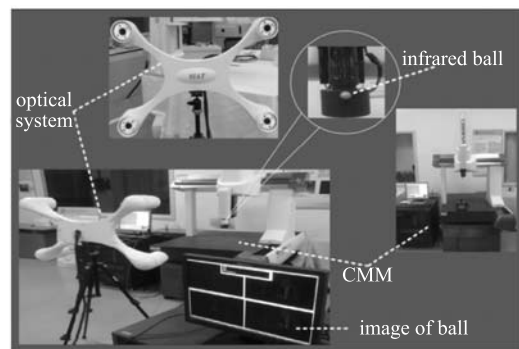


图8 定位算法系统验证示意图

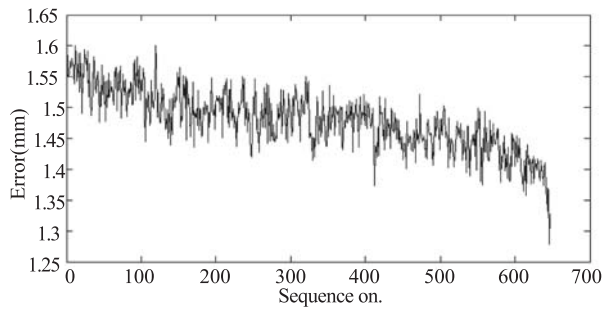


图9 工作距离1.5米时光学定位系统误差

验的真值(Ground Truth)。光学标记球的空间三维坐标利用重建算法中仿真精度最高(见仿真实验结果)的PFE算法求解。图9所示为工作距离1.5 m时,光学定位跟踪系统的定位误差结果,通过650个测量值计算得到系统实验RMS误差为1.45 mm。

5 总 结

本文首先介绍了近红外波段下的多目光学定位跟踪系统的硬件组成,包括近红外照明电路、近红外被动发射式标靶和多视角摄像机阵列三部分。近红外照明电路采用了850 nm波长的红外发光管阵列,并且能够自动检测环境光强度,自适应调整发光强度,以达到较佳的红外成像质量。我们采用了3D打印机生成了精度为0.2 mm的光学反射标靶作为系统的定位跟踪目标。四个130万像素的CCD摄像机组成了多目光学定位跟踪系统的成像模块,对标靶进行实时采集。

定位跟踪系统的算法分成特征检测、特征点匹配、三维点重构和器械识别四个部分。我们采用改进的区域生长法,利用工作距离内的集合约束,优化特征检测的范围;特征点匹配是定位算法的重要组成部分。我们提出了一种基于特征矩阵的点匹配算法。该算法对噪声有较好的稳定性;空间点三维重构算法讨论了如何从图像点恢复与它对应的空间点在世界坐标系中的坐标。我们提出了基于均值、成像误差以及距离的加权平均三种算法。仿真实验和系统实验表明他们相比传统的MinDis和MinPro算法有更高的定位精度。

参 考 文 献

[1] Claron Technology Inc., Micron Tracker [EB/OL]. <http://www.clarontech.com/microntracker.php>.
 [2] NDI Measurement Solutions in Medical, Polaris Family of Optical Tracking Systems [EB/OL]. <http://www.ndigital.com/>

[medical/polarisfamily.php](http://www.ndigital.com/medical/polarisfamily.php)
 [3] Advanced Realtime Tracking, ARTTRACK System [EB/OL]. <http://www.ar-tracking.com/products/tracking-systems/arttrack-system/>
 [4] Andrew D W, David G T, Donald D F. Accuracy assessment and interpretation for optical tracking systems [J], In Medical Imaging 2004: Visualization, Image-Guided Procedures, and Display, 2004., 5367: 421-443.
 [5] Tomasi C, Kanade T. Shape and motion from image streams under orthography: a factorization method [J]. International Journal of Computer Vision, 1992, 9(2): 137-154.
 [6] Wiles A D, Thompson D G, Frantz D D. Accuracy assessment and interpretation for optical tracking systems [C] // Proceedings of The International Society for Optical Engineering. 2004, 421-32.
 [7] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
 [8] Camera Calibration Toolbox for Matlab [EB/OL]. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/
 [9] Okutomi M, Kanade T. A multiple-baseline stereo [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1993, 15(4): 34-39.
 [10] Ayache N, Lustman F. Trinocular stereovision for robotics[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13: 73-85.
 [11] Wei N, Li B P, He Q, et al. A novel correspondence searching strategy in multiocular vision [C] // 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minnesota, USA, May 2012.
 [12] Hartley R, Sturm P. Triangulation [J]. Computer Vision and Image Understanding, 1997, 68(2): 146-157.
 [13] Hartley R I, Zisserman A. Multiple view geometry in computervision [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
 [14] Byrod M, Josephson K, Astrom K. Fast optimal three view triangulation [C] // in Proceedings of Asian Conference on Computer Vision, Tokyo, 2007, 4844: 549-559.
 [15] Kahl F, Hartley R. Multiple view geometry under the L_{∞} -norm [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence, 2008, 30(9): 1603-1617.
 [16] Liu W, Hu C, He Q, et al. 3D optical localization system based on four video cameras [J]. Journal of Information, 2010, 13(6): 1909-1927.
 [17] He Q, Hu C, Liu W, et al. Simple 3-D point reconstruction methods with accuracy prediction for multiocular system [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18(1): 366-375.