

文章编号: 0253-2239(2009)04-1010-05

# 借助标志点的深度数据全局匹配方法

刘晓利 彭 翔 殷永凯 李阿蒙 赵晓波

(深圳大学光电工程学院, 教育部光电子器件与系统重点实验室, 广东省光电子器件与系统重点实验室, 深圳 广东 518060)

**摘要** 深度数据匹配是三维光学测量系统的关键问题, 借助标志点匹配方法具有廉价、方便、快速等优点, 但当前该方法对多视场数据匹配的误差积累问题没有解决。阐述一种借助非编码标志点进行深度数据匹配的方法, 利用图像处理及模式识别技术提取标志点, 并由光学测量系统标定信息获得标志点三维局部坐标, 利用欧式空间距离的刚体不变性, 完成两个视场深度数据的精确匹配。并提出一种全局迭代优化算法完成对多个视场深度数据的全局精确匹配, 避免了误差积累, 最大匹配误差从 0.123 mm 降到 0.076 mm。实验证实了方法的有效性, 不仅可以自动、快速完成两个视场深度数据的精确匹配, 而且解决了对多个视场深度数据匹配的误差积累问题。

**关键词** 机器视觉; 深度数据匹配; 标志点; 全局优化

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092904.1010

## A Method for Global Registration of Range Data Combined with Markers

Liu Xiaoli Peng Xiang Yin Yongkai Li Ameng Zhao Xiaobo

(College of Optoelectronic Engineering, Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education, Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Guangdong Province, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

**Abstract** Range data registration is a key issue of 3D optical measurement. The method based on markers has the advantage of cheapness, convenience and fastness. But the problem of error accumulation is still unsolved for multiple viewing fields. A fine registration method to register the multiple range data with non-coding markers is proposed. Image process and pattern recognition techniques are employed to detect the sub-pixel location of markers. The markers' local coordinates in 3D space are computed from optical measurement system. Through the principle of rigid invariance of distance in 3D Euclidean space, the fine registration of two range data is completed. Moreover, a global iterative algorithm is proposed for accurate registration of multiple range data. Using this algorithm, the maximum error reduces from 0.123 mm to 0.076 mm. The experimental results illustrate the validity of this method. It can automatically fast register multiple range data and decrease error accumulation.

**Key words** machine vision; range data registration; markers; global optimization

## 1 引 言

深度数据的高精度空间匹配<sup>[1]</sup>是三维数字成像及造型领域中非常关键的一个环节, 该技术在逆向

工程、曲面无损检测和虚拟现实等诸多领域都具有非常广泛的应用。由于三维扫描设备的视场限制以及物体自身的遮挡关系, 不可能在一个视点位置获

**收稿日期**: 2008-07-04; **收到修改稿日期**: 2008-09-17

**基金项目**: 国家自然科学基金(60275012, 60775021), 广东省科技计划(2007B010200039)和深圳市科技计划(200619, 200734)资助课题

**作者简介**: 刘晓利(1980-), 男, 讲师, 博士, 主要从事三维光学测量、计算机视觉、计算机图形学等方面研究。

E-mail: bumblebee\_liu@126.com

**导师简介**: 彭 翔(1955-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事三维数字成像及造型、光学测试技术、光学信息处理等方面研究。E-mail: xpeng@szu.edu.cn

得物体的全部深度信息。为了得到被测物体完整的数据模型,就需要从多个视角对物体进行重复扫描,直到采集完物体的全部深度信息为止。通常在每个方向得到的深度数据都是位于此方向摄像机的坐标系内。这样,对于物体上的同一点,在不同摄像机坐标系内的坐标互不相同。要从不同方向的深度数据中得到物体表面的完整表达,需要确定各个方向深度数据之间的变换关系,把所有的深度数据转化到同一个坐标系内,该过程叫做匹配(Registration)。其中,各视场深度数据之间的变换关系是一个 6 自由度的刚体变换。

目前,深度数据的精确匹配方法主要有基于高精度机械控制装置(如机械手臂、三坐标测量机等)方法<sup>[2]</sup>;基于迭代最近点(ICP)算法的优化方法<sup>[3]</sup>;以及基于标志点的方法<sup>[4~6]</sup>。高精度的机械运动和定位装置价格昂贵,而且在实际应用中需要反复调试,因此常常造成诸多不便。ICP 方法虽然不需要昂贵的装置,但其需要对海量数据进行迭代优化,通常光学三维扫描设备单视场测量得到的三维数据点就有 100 万之多,而对多个视场采集的三维数据进行迭代计算是相当耗时的,这严重影响了测量周期。而基于标志点的匹配方法不存在以上两种问题,而且能达到自动、高精度的匹配,目前在工业测量及逆向工程中得到广泛应用。标志点有编码和非编码之分,编码标志点通过图像编码使得标志点具有唯一性;而非编码标志点形状大小完全相同,不具有唯一性。吴斌等对于编码标志点技术做了系统的研究<sup>[4]</sup>,将编码标志点应用于大场景视觉检测及定位方面。张维中、张丽艳<sup>[5]</sup>结合编码标志点与非编码标志点共同完成了大模型的深度数据匹配。罗先波介绍了利用非编码标志点对两个视场的深度数据进行匹配的方法<sup>[6]</sup>。目前,基于非编码标志点的匹配方法大多采用顺序的两两匹配,这样会产生误差积累问题,即造成从第一个匹配的深度数据到最后匹配的深度数据之间的匹配误差过大,甚至会产生明显的缝隙。

本文介绍一种基于非编码标志点进行深度数据全局匹配方法,该方法利用标志点相对位置的刚体变换不变性,可自动快速完成深度数据的空间匹配;此外,本文提出一种全局迭代优化算法来避免了全局匹配的误差积累问题,最后给出了实验误差比较。

## 2 匹配方案

借助非编码标志点完成多个视场深度数据的全

局匹配,主要分三步骤:第一,标志点的亚像素提取;第二,两个视场标志点的匹配;第三,多个视场标志点的全局匹配。

### 2.1 标志点的亚像素提取<sup>[7]</sup>

实验采用白色圆形标志,如图 1。圆形标志经透镜成像后成为椭圆,为了达到对椭圆中心的亚像素级精度定位,算法分为以下步骤:

- 1) 高斯滤波去除图像噪声;
- 2) 边缘检测算子(Canny 算子)对椭圆边缘进行像素级粗定位;
- 3) 标志点的自动识别(满足以下两个条件的被认为是标志点:即标志点轮廓所包含的像素数在一定范围内波动;而且标志点轮廓是闭合的);
- 4) 椭圆边缘的亚像素级精定位(本文对像素级边缘的每个像素的  $5 \times 5$  邻域进行三次多项式曲面拟合,求取曲面的一阶导数局部极值的位置,即亚像素位置);
- 5) 对椭圆边缘点进行最小二乘拟合,得到圆心的亚像素定位。

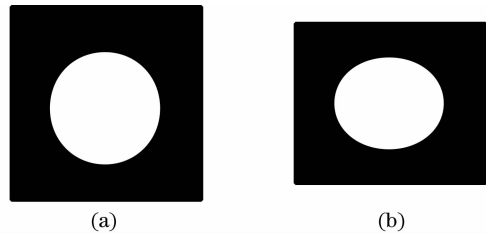


图 1 标志点图样 (a) 原始圆形图, (b) 经透视变换后成为椭圆

Fig. 1 Marker pattern, (a) original circle image, (b) ellipse image through projective transform

### 2.2 两个视场的标志点匹配

用三维测量系统对实物进行测量,即可得到多个视场下的深度数据,同时也得到了不同视场下的标志点的空间三维坐标,其坐标值均是在三维测量系统的局部坐标系下的。匹配的实质便是将不同坐标系下的测量得到的三维深度数据进行坐标变换(旋转与平移)转化到统一的坐标系下。

对于两个视场标志点的对应搜索主要应用欧式距离在空间刚体变换不变性原理来完成。由于标志点个数有限,不必过多考虑算法的时间复杂度,穷举搜索方法很容易实现,具体算法采用徐文立提出的点模式匹配算法<sup>[8]</sup>。该方法根据任意两点间距离的刚体不变性质,给出了匹配团、支持点对、支持指标集和指标矩阵等概念以及它们满足的性质和定理。本文利用该算法完成了两个视场标志点的对应搜

索,这里不再详细阐述该算法,具体可参见文献[8]。

利用搜索到的标志点匹配点对(至少需要三个对应标志点对)可计算其相应的位置变换关系。假设两个视场获得的标志点匹配点对集合  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ ,  $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ , 其中  $p_i$  与  $q_i$  为相匹配的三维点,但其坐标均在各自的局部坐标系下。这样,存在一个坐标变换矩阵  $M$  将  $Q$  转化到  $P$ 。由于存在测量误差, $Q$  转化后并不能与  $P$  完全重合。变换矩阵  $M$  的求取可归结为一个优化问题:  $\min: E = \sum_{i=1}^n \|p_i - M \cdot q_i\|^2$ , 其中,  $p_i, q_i$  均为齐次坐标,  $M = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ ,  $R$  为旋转矩阵,  $T$  为平移向量。解该优化问题方法可采用奇异值分解(SVD)方法<sup>[9]</sup>。

### 2.3 多个视场的标志点全局匹配

由 2.2 方法得到两个视场的相匹配的标志点集合的位置变换关系(此变换即为两个视场采集的深度数据的变换关系)。这样,顺序的两两匹配,最终可将所有视场采集的标志点匹配到统一坐标系下。由于该方法建立在顺序两两匹配基础上,因此,该方法存在匹配误差积累。为了将误差分散化,本文采用一种迭代优化的方法,如下:

**Input:** 所有视场的标志点集合  $V_i$  到世界坐标系的变换矩阵  $M_i, i=1, 2, \dots, n$ ;

**Output:** 优化后的各视场标志点集合  $V_i$  到世界坐标系的变换矩阵  $M_i, i=1, 2, \dots, n$ ;

迭代优化:

```
While (no converges) { /* 收敛条件:
 $\forall \Delta M_i, \|\Delta M_i - I\| < \epsilon^*$  /
  For ( $i = 1; i < n; i++$ ) {
    1、提取与  $V_i$  匹配的所有标志点对;
    2、将标志点转换到世界坐标系;
    3、计算转换矩阵  $\Delta M_i$ ;
    4、 $M_i = \Delta M_i \cdot M_i$ ;
  }
}
```

算法中,计算转换矩阵  $\Delta M_i$  方法与 2.2 中介绍方法相同,求取的是利用两两匹配。标志点转换到世界坐标系下后,在当前世界坐标系下的最优变换值。当该变换值趋于单位矩阵时,表示当前世界坐标系下的变换即为最优变换,停止迭代。

由于两个视场匹配仅仅利用了两个视场所共同的标志点进行优化,忽略了与其他视场所共同的标

志点。而该算法同时考虑了所有视场所共同的标志点,这样可达到全局优化的目的,从而将匹配误差分散化,减少了误差积累。图 2 为其示意图,其中图 2(a)为两个视场情况,图 2(b)为多个视场情况。假设  $i=1$ ,即调整第一个视场  $V_1$  到世界坐标系的变换矩阵,如图 2(b),设  $V_1$  与 3 个视场( $V_2, V_3, V_4$ )有公共点对;对于两个视场情况如图 2(a), $V_2$  与  $V_1$  有 5 个公共点对,这 5 个点确定一个变换矩阵,该矩阵为只能保证  $V_1$  与  $V_2$  之间匹配最优。而对多个视场情况,如图 2(b), $V_1$  与  $V_2$  有 5 个公共点对,与  $V_3$  有 6 个公共点对,与  $V_4$  有 4 个公共点对。这样,由这 15 个点,便能确定出  $V_1$  与所有 3 个视场( $V_2, V_3, V_4$ )匹配最优的变换矩阵。

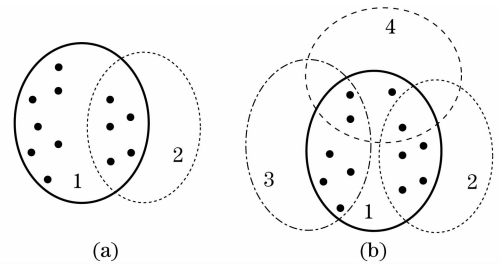


图 2 多视场匹配示意图, (a) 两个视场, (b) 多个视场

Fig. 2 Sketch of global registration,

(a) two viewing fields, (b) multiple viewing fields

## 3 实验结果

采用一个石膏像实验,将标志点均匀粘贴在石膏像上,并采用本实验室研发的光学三维数字化系统从 10 个视场采集了 10 幅灰度数据和深度数据。系统采用光栅条纹投影方法进行三维测量,其在  $400 \times 300$  mm 的视场下,测量精度为 0.05 mm。

### 3.1 两个视场数据匹配结果

如图 3, (a) 为其中两个视场的灰度数据,分辨率为  $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ ; (b) 为相应的深度数据,由于贴标志点处得到的深度信息已经不是物体本身的深度信息,故已删去。

图 4 显示了标志点的匹配结果,红色十字为第一幅图的标志点,共提取出 13 个标志点;蓝色圆圈为第二幅图的标志点,共提取 11 个标志点;十字和圆重合且旁边有数字标注的为两幅图相匹配的标志点,共 7 组,实验中深度数据测量精度为 0.05 mm,故标志点最大匹配集提取的误差取 0.1 mm(即基于几何推理的点模式匹配方法所给定的允许误差  $\epsilon$ ),图 4 右下角未标号的十字和圆几乎重合的点对误差大于 0.1 mm,故被排除。表 1 列出了 7 组匹配

标志点的距离误差  $e_i = d(X_i - X'_i)$ 、平均误差 (Mean error:  $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i$ ) 和 RMS 误差 (RMS error:  $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n}}$ )。图 5 显示了由这些标志点确定的变换矩阵计算得到的两个视场深度数据的匹配结果。

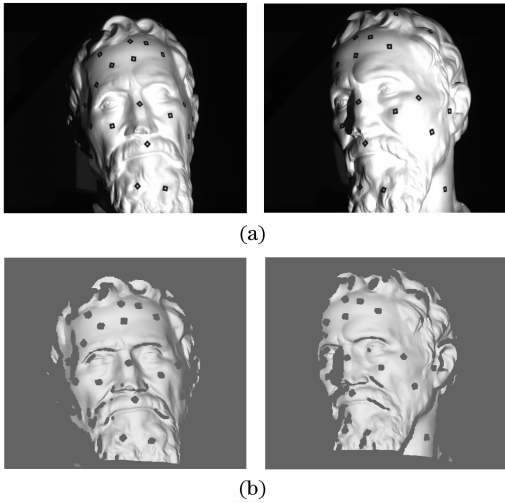


图 3 两个视场采集的灰度数据与深度数据, (a) 两个视场的带标志点的灰度图, (b) 两个视场的深度数据

Fig. 3 Grey and range data from two viewing fields, (a) grey images of markers from two viewing fields, (b) range data from two viewing fields

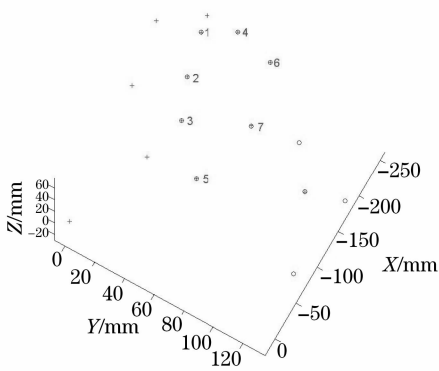


图 4 标志点匹配结果

Fig. 4 Result of markers registration

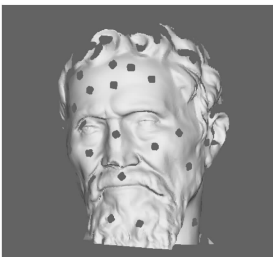


图 5 两个深度数据的匹配结果

Fig. 5 Result of two range data registration

表 1 匹配点误差值

Table 1 Distance error of markers registration

Pairs	1	2	3	4	5	6	7
Error /mm	0.0361	0.0372	0.0100	0.0140	0.0083	0.0142	0.0584
Mean error:0.0254 mm; RMS error:0.0309 mm							

### 3.2 全部视场数据匹配结果

由上节匹配结果分析可知,对于两视场的匹配精度可以控制在 0.1 mm 以下,但对于全部视场的匹配,建立在这种两两匹配基础上,往往会产生积累误差。采用 2.3 所述的全局迭代优化算法可大大减少积累误差。实验对 10 个视场的数据进行匹配,共贴 45 个标志点,实验统计了全局优化前和全局优化后应用于匹配的所有点对的误差情况,如表 2。显然,经过全局优化过程,匹配点对的最大误差明显降低,并控制在 0.1 mm 以下;此外平均误差和均方根误差都有所降低。图 6 为全局匹配后的结果。

表 2 全局优化对匹配误差的影响

Table 2 Influence of global optimization on registration error

Error /mm	Max Error	Mean Error	RMS Error
Before optimization	0.122641	0.043630	0.052609
After optimization	0.076443	0.034887	0.038929

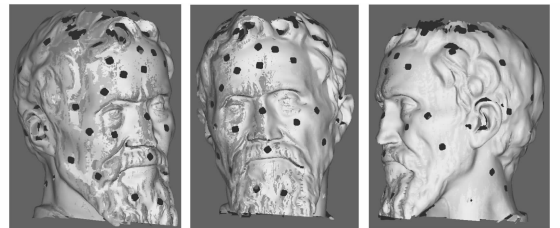


图 6 全局匹配结果

Fig. 6 Results of global registration

## 4 结 论

实验表明,提出的基于非编码标志点进行深度数据全局匹配的方法,不仅可以自动、有效地完成深度数据的匹配,并且利用全局优化方法解决了全局匹配的误差积累问题。此外,该方法用少数的标志点,相对于 ICP 算法不需要对大量三维数据点进行迭代优化,大大节省了匹配时间。然而,由于标志点的粘贴使得在该位置的测量数据不是原来模型的数据,因此标志点处的深度数据补偿有待进一步研究。此外,由于该方法匹配精度依赖于标志点的测量精度和提取精度,进一步深入分析这两个因素对本文方法的影响有望提高匹配精度。

## 参 考 文 献

- 1 R. J. Campbell, P. J. Flynn. A survey of free-form object representation and recognition techniques[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2001, **81**(2): 166~210
- 2 Y. Sato, M. D. Wheeler, K. Ikeuchi. Object shape and reflectance modeling from observation [C]. *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*, ACM SIGGRAPH, Los Angeles, 1997: 379~387
- 3 P. J. Besl, N. D. McKay. A method for registration of 3D shapes [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, **14**(2): 239~256
- 4 Wu Bin. *Study on Key Technologies of 3D Digital Measurement of Large-Scale Objects* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2002, 36~86  
吴 斌. 大型物体三维形貌数字化测量关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2002, 36~86
- 5 Zhang Weizhong, Zhang Liyan, Zhang Hui *et al.*. 3D reconstruction from multiple perspective views with marked points [J]. *China Mechanical Engineering*, 2006, **17**(16): 1711~1715  
张维中, 张丽艳, 张 辉 等. 基于标记点的多帧透视图像三维重建算法[J]. *中国机械工程*, 2006, **17**(16): 1711~1715
- 6 Luo Xianbo, Zhong Yuxian, Li Renju. Data registration in 3-D scanning systems[J]. *J Tsinghua Univ (Sci & Tech)*, 2004, **44**(8): 1104~1106  
罗先波, 钟约先, 李仁举. 三维扫描系统中的数据配准技术[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2004, **44**(8): 1104~1106
- 7 Yin Yongkai, Liu Xiaoli, Li Ameng *et al.*. Sub-pixel location of circle target and its application [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(4), supplement, 47~50  
殷永凯, 刘晓利, 李阿蒙 等. 圆形标志点的亚像素定位及其应用 [J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(4)增刊, 47~50
- 8 Xu Wenli, Zhang Lihua. A geometric reasoning based algorithm for point pattern matching[J]. *Science in China*, 2002, **32**(4): 553~560  
徐文立, 张立华. 一种基于几何推理的点模式匹配算法[J]. *中国科学*, 2002, **32**(4): 553~560
- 9 D. W. Eggert, A. Lorusso, R. B. Fisher. Estimating 3-D rigid body transformations: a comparison of four major algorithms[J]. *Machine Vision and Applications*, 1997, **9**(5-6): 272~290