

# 视觉图像三维重构计算一般性框架研究<sup>\*</sup>

许晓伟 王知行 张艳青 梁英宏 曹晓叶

(华南理工大学计算机科学与工程学院 广州 510640)

**摘要** 三维实体数字图像重建是当前计算机视觉研究领域的热点课题,涉及到相机标定、对应点匹配和三维重构计算等关键技术。本文回顾了三维重建建模的研究现状,分析了现有理论和方法在实际应用中存在的问题;在此基础上进行了相关研究,总结出了三维重建计算的一般性框架,提出了一些研究观点和方法,并探讨了三维重建技术的难点和发展趋势。

**关键词** 三维重建,计算机视觉,相机标定,对应点匹配,重构计算框架

## Research on the Common Framework of 3D Reconstruction Computation for Computer Vision

XU Xiao-wei WANG Zhi-yan ZHANG Yan-qing LIANG Ying-hong CAO Xiao-ye

(School of Computer Science and Engineering, South China Univ. of Tech., Guangzhou 510640, China)

**Abstract** 3D reconstruction modeling, which involves camera calibration, image points mapping and reconstruction computation, is currently a hot problem in the research field of computer vision. In this paper, the recent researches of 3D reconstruction modeling for computer vision are reviewed. Based on summarizing and studying these methods, this paper proposes a common framework for 3D reconstruction computation and presents some potential research viewpoints and schemes. The difficulties and development trend of 3D reconstruction are also discussed in this paper.

**Keywords** 3D reconstruction, Computer vision, Camera calibration, Match of mapping points, Reconstruction computation frame

## 1 引言

三维重建是计算机视觉模拟人眼功能所需要完成的最后一步,即恢复景物的三维信息。它是一个研究非常活跃的重要领域,也是计算机图形图像研究领域中的经典课题,被广泛应用在工业检测、军事、医学、航空航天、娱乐等多个领域。目前重建方法主要分为两大类:一类是传统的主动视觉方法,如利用三维激光扫描仪等设备得到景物的三维点坐标。该方法受空间尺寸的限制,无法用于大型景物,成本高,且要求用户具备一定的操作水平;另一类是基于图像的被动视觉方法,即利用相机获取景物的二维图像,根据图像几何与拓扑信息重构其三维信息,即基于图像建模<sup>[1,2]</sup>。与传统方法相比,后者对设备要求不高,也是本文研究的主要内容,其原理是按照不同视点拍摄的两幅或多幅图像来确定景物的三维结构,问题的基础是物理世界中景物表面上的每一个三维点都投影到唯一的一对二维图像点上,要解决的问题有相机标定、对应点匹配和在此基础上的三维重建,并因此扩展出视频跟踪、虚拟现实等许多相关的课题。目前比较有代表性的研究成果有:文献[3]提出的三维重建的方法,可解决已知对应点和内参数情况下三维结构的恢复问题,是这个领域的经典算法;文献[4]提出了一种基于网格平面的“最简单的摄像机标定方法”;文献[5]给出了大量的多视图立体重建算法。这些基于不同的出发点和思路的理论和方法,对于不同的工程背景有其各自的应用价值,因此有必要对所涉及到的技术进行综合比较和分析,总结重建计算的一般性框架,以揭示存在的问题,探讨发展的方向。

## 2 三维实体重建建模基础

### 2.1 相机模型

采用齐次坐标表示,世界坐标系下三维空间中的某一点  $M=[XYZ1]^T$  与其在像素坐标系下成像平面上的投影点  $m=[uv1]^T$  满足如下关系:

$$sm = P_w^c M = A_c^t K_w^c M \quad (1)$$

这里  $s$  是一个比例因子,  $P_w^c$  是一个  $3 \times 4$  投影矩阵,表示相机成像系统的针孔透视模型<sup>[6]</sup>,可分解成相机内参数矩阵  $A_c^t$  和外参数矩阵  $K_w^c$ :

$$A_c^t = \begin{bmatrix} f_x & q & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad K_w^c = \begin{pmatrix} R_w^c & t_w^c \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

这里的  $f_x, f_y$  为在成像平面  $u$  轴和  $v$  轴方向上的镜头焦距,  $q$  为  $u$  轴和  $v$  轴间的倾斜因子,  $(u_0, v_0)$  为相机中心在像素坐标系中的主点坐标,  $R_w^c, t_w^c$  为世界坐标系到相机坐标系的旋转矩阵和位移向量。由于加工、装配误差的存在,相机光学系统与针孔模型有一定的差别,使得实际成像与理想成像之间存在非线性畸变,一般考虑二阶畸变<sup>[7]</sup>:

$$\begin{cases} \delta_x = k_1 x(x^2 + y^2) + [p_1(3x^2 + y^2) + 2p_2 xy] + s_1(x^2 + y^2) \\ \delta_y = k_2 y(x^2 + y^2) + [p_2(3x^2 + y^2) + 2p_1 xy] + s_2(x^2 + y^2) \end{cases} \quad (3)$$

式中  $k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, s_2$  是畸变系数。

### 2.2 外极几何

外极几何<sup>[5]</sup>是指将立体视觉中左(右)图中的匹配点映射成右(左)图中的对极线的数学关系:如图1所示,一个目标点

<sup>\*</sup>广州市科技计划项目(项目编号:200723-D0131);广东省自然科学基金(B6-109-497)。许晓伟 博士生;王知行 教授,博士生导师。

M和它在两个图像平面上的投影点m和m'义了一个平面Π,与两个成像平面相交于外极线l<sub>m</sub>和l'<sub>m</sub>。所有外极线的交点在两个平面上分别定义了一个外极点,即通过两相机光心O<sub>c</sub>和O'<sub>c</sub>的直线与两成像平面的交点。外极几何的代数描述可用一个秩为2的3×3基础矩阵F表示:

$$F = A_c^{-T} [c] \times R_c A_c^{-1} \quad m^T F m' = 0 \quad (4)$$

F包含了两个相机的内参数和一个相机对于另一个的刚性方位变换。当内部参数是已知时,可得到仅与相机方位有关的本质矩阵E:

$$E = [c]_c \times R_c \quad (5)$$

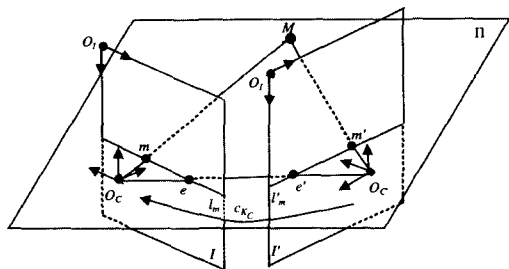


图1 两个相机之间的外极几何关系

### 2.3 三角测量

假定空间任意一点M(x<sub>w</sub> y<sub>w</sub> z<sub>w</sub>)在两个相机的成像平面上的像点分别为m<sub>1</sub>(u<sub>1</sub> v<sub>1</sub>)和m<sub>2</sub>(u<sub>2</sub> v<sub>2</sub>),两相机C<sub>1</sub>和C<sub>2</sub>的投影矩阵分别为P<sub>1</sub>和P<sub>2</sub>,分别代入公式(1),可以推导出:

$$\begin{bmatrix} u_1 m_{31}^C - m_{11}^C & u_1 m_{32}^C - m_{12}^C & u_1 m_{33}^C - m_{13}^C \\ v_1 m_{31}^C - m_{21}^C & v_1 m_{32}^C - m_{22}^C & v_1 m_{33}^C - m_{23}^C \\ u_2 m_{31}^C - m_{11}^C & u_2 m_{32}^C - m_{12}^C & u_2 m_{33}^C - m_{13}^C \\ v_2 m_{31}^C - m_{21}^C & v_2 m_{32}^C - m_{22}^C & v_2 m_{33}^C - m_{23}^C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{14}^C - u_1 m_{34}^C \\ m_{24}^C - v_1 m_{34}^C \\ m_{14}^C - u_2 m_{34}^C \\ m_{24}^C - v_2 m_{34}^C \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中m<sub>jk</sub><sup>C</sup>为相机C<sub>j</sub>的3×4投影矩阵P<sub>j</sub>中第j行k列元素。已知两个相机的投影矩阵和空间点在两个不同位置的相机所拍摄图像中的像素坐标,由式(6)就可以确定点的空间三维坐标。

## 3 三维重构关键技术

### 3.1 相机标定

相机标定是从二维图像获取三维欧氏结构信息必不可少的一步,而在未标定情况下只能实现射影重构。文献[8]介绍了2003年之前标定方法的研究成果,这里就不再一一详述。

按照是否需要标定参照物,相机标定可分为传统标定方法和自标定方法。传统标定方法的特点是使用结构已知、精度很高的标定块作为空间参照物,通过空间点和图像点之间的对应关系建立摄像机模型参数的约束,然后通过优化算法来求取这些参数。为提高标定精度,就要采用非线性模型来补偿镜头畸变[7]。在不能放置参照物的场合就要采用相机自标定技术。多数自标定的本质是基于射影变换的不变量:绝对二次曲线或其对偶—绝对二次曲面,所得到的解既不唯一也不稳定,易受噪音干扰,误差较大。

张正友的网格平面标定方法[4]是在自标定与传统标定之间的一个妥协方案:从不同角度拍摄一网格平面,然后利用单

应性矩阵得出相机的内参数。这一方法使用灵活,有较好的鲁棒性,但由于假定网格平面上的直线经透视投影仍然为直线,实际上引入了畸变误差。其他类型的标定方法还有基于单像平面灭点方法[9]、基于景物对称性方法[10]、基于方向约束[11]、空间正交约束[12]方法等。这些方法大多是基于发掘场景结构信息,寻求新的约束条件,来达到求解相机线性模型或简化模型内外参数的目的;与自标定类似,没有考虑非线性畸变,因而结果精度不高,不可靠。

标定方法的选择需要考虑工程背景的精度要求和测量范围要求。先利用线性或自标定方法求解相机参数,再以求得的参数为初始值,考虑畸变因素,并利用非线性优化算法进一步提高精度,将可能获得应用更为广泛的标定方法。由此在前期工作中我们提出了一种基于标准图形估计准则的自适应标定方法[13,14],利用设计好的标准图形进行图像畸变状况快速评估,选择合适的相机标定方法,并取得了较好的效果[15,16]。

### 3.2 对应点匹配

对应点匹配是立体视觉的核心问题,其任务是在两幅或多幅图像中寻找景物表面某一点投影到不同图像平面上的像素点之间的对应关系(视差信息)。由于相机方位、存在遮挡和运动不连续等问题,导致对应点丢失、误配,结构歧义性;此外,光度学和几何学畸变、测量误差及噪声等因素造成图像数据的不确定也会影响匹配的准确性。至今也没有好的通用的匹配方案,但在应用中可利用图像性质或相机运动约束条件,从而部分地解决这个问题[17]。好的匹配方案一般包括:合理选择匹配基元,充分利用匹配约束条件和稳定的匹配算法。

按照匹配元素选择不同,可以分为灰度区域匹配和特征匹配。基于灰度相关的方法根据像素的灰度、颜色和纹理的连贯性来测量[18];基于景物的角点或边缘点等特征的方法通过空间景物的结构信息来解决匹配过程中的歧义性[19]。图像中具有可分辨性、不变性和稳定性的属性都可以作为匹配特征,所以像素灰度也是一种图像特征。常用的基本特征(匹配基元)包括点特征、直线特征和区域特征等。匹配基元类型的选择取决于匹配图像对本身的属性特点和应用要求。

匹配问题的困难之处在于存在大量的假匹配点,需要根据景物的实际信息和一些约束条件来剔除误匹配。常用的匹配约束有:唯一性。景物表面任意一点到观察点的距离是唯一的,其视差是唯一的;相似性。在某种度量下,同一物理特征在左右两幅图像中表现出相似的性质;顺序一致性。两幅图像中同一极线上的对应点的顺序是一致的;极线约束。在像平面上选定一点,它在另一像平面上的对应点只能处于与之对应的极线上;视差约束。限制了被观测景物表面变化的剧烈程度。建立在几何成像基础上的极线约束和基于景物外形条件的视差约束经常用于立体匹配中,以加快运算速度,提高准确率。

三维重构的质量直接取决于所采用匹配算法。匹配算法本身包括匹配测度和匹配策略两个部分[17]。对应点匹配好坏情况的测量称为匹配测度,常用方法有:基于灰度相关的匹配测度方法、基于矩的匹配测度方法、基于聚类的匹配测度方法、基于图论的匹配测度方法、基于松弛迭代的匹配测度方法。匹配是一个特征搜索的过程,由于成像条件和视角的差异,同一特征在两个视角下可能存在明显的差异,为了确定左右特征的对应关系,就需要进行大范围的搜索。为了提高搜索和匹配的速度,就需要引入相应的匹配策略。目前常用的匹配

策略有:动态规划法、变灰度级相关检验、序贯相似性检验、分辨率相关检验、金字塔方法、遗传算法等。匹配就其数学的本质而言就是建立在某些约束下的优化问题,因而近年来引入了多种优化算法,包括代数、几何和统计学等方法,如形式化为马尔科夫网络-贝叶斯置信传播求解<sup>[20]</sup>、利用 LM(Levenberg-Marquardt)迭代算法<sup>[21]</sup>、神经网络方法<sup>[22]</sup>等。

### 3.3 三维重构计算及其一般性框架

在建立图像对之间的对应关系之后,就可以通过几何约束进行三维重构。重构有多种类型,按层次可分为射影重构、仿射重构、度量重构以及欧氏重构;按照相机是否标定,可分为基于相机标定的校正重构和非标定相机的非校正重构。对于标定相机,可在相差一个相似变换下重构;而对于未标定相机,可在相差一个任意的射影变换下实现重构。

欧氏几何下三维重构计算的一般性框架是在相机已标定情况下,从重构空间点开始,由三维顶点计算空间直线、曲线,由此重组空间平面、曲面,最后重构三维实体。如图 2 所示,为了进行可度量重构,即确定景物的长度比例和角度,必须首先建立不同视角相机之间的空间位置关系,即基础矩阵估计;再根据相机内参数将基本矩阵转化为本质矩阵;然后设第一视角相机为坐标系原点,就可计算出第二视角相机相对于第一视角相机的旋转和平移,得到相机的投影矩阵;最后用三角测量计算点的三维空间坐标<sup>[3]</sup>。

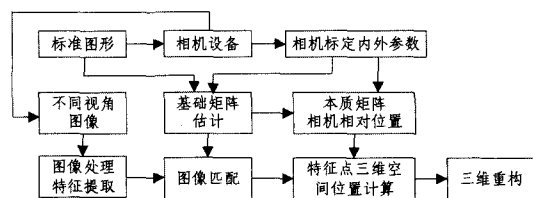


图 2 相机标定情况下的三维重构框架

当相机未标定时,射影几何意义下三维重构一般首先通过图像间的对应点信息求出基础矩阵,再将基础矩阵分解,求解相机的投影矩阵。在场景控制点三维坐标已知的条件下可以实现三维欧氏重构。在不依赖于场景控制点和标定参照物条件下的欧氏三维重构方法称为相机自标定或不标定三维重构方法<sup>[5]</sup>。该方法仅利用相机在运动过程中拍摄多幅多视角图像(序列图像),根据图像与图像之间的约束关系来计算相机模型的参数,进行相机自标定,同时完成三维重构,其一般性框架如图 3 所示。

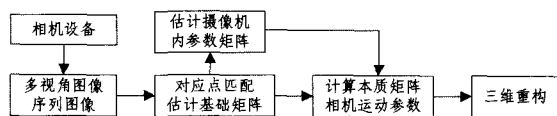


图 3 相机不标定情况下的三维重构框架

针对相机内参数未知不变的情况,自标定三维重构方法主要有两大类:第一类基于基础矩阵和对极几何来计算内参数<sup>[23]</sup>,常用方法是在两两图像之间建立 Kruppa 方程,解出相机内参数;第二类主要是分层逐步自标定重构,即首先对序列图像做射影重构,在此基础上再进行仿射标定和欧氏标定,如基于绝对二次曲面的方法<sup>[24]</sup>。针对在实际应用中相机内参数变化的情况,Heyden<sup>[25]</sup>提出了光束平差(Bundle Adjustment)算法,在相机做一般运动(纯平移或旋转运动)的条件下,利用序列图像实现欧氏重构,并且全面优化三维重构点、相机参数和常数因子。

从本质上说,上述方法只是利用了相机内参数自身约束,这些约束与场景和相机的运动无关。近年来一些研究者注意到可利用场景的空间结构信息来实现自标定重构,例如:文献[26]利用由无穷远平面诱导单应性矩阵的多视图重构算法,文献[27,28]利用空间平面约束(矩形、等腰梯形或等边三角形等信息)求解相机内参数方法。而更进一步的研究发现可利用场景约束进行单视图三维重构:文献[29]利用平面内的平行性、正交性约束形成的影灭点、影灭线进行结构场景的三维重构;文献[30]提出了一种基于贝叶斯网络模型的室内场景单视图三维重构方法;文献[31]利用水平面和垂直面快速区域分类算法重构室内场景;文献[32]给出了一种单视图加单平面镜像结构约束下实现三维重构的方法。

在未标定序列图像三维重构问题的相关研究中,几何视觉领域<sup>[5]</sup>与视觉跟踪领域<sup>[33]</sup>形成了技术交叉,都是在一组图像序列中找到感兴趣的目标,不同的是几何视觉将目标重构为三维形式,而视觉跟踪要恢复目标的运动参数;很多技术被相互借鉴和改进,例如光束平差法<sup>[25,34]</sup>、由运动求结构中的因数分解法<sup>[35]</sup>、卡尔曼(Kalman)方法<sup>[36]</sup>和扩展卡尔曼滤波方法<sup>[37]</sup>等。相对于光束平差法,卡尔曼方法在增加、减少观测图像时,不需要重新进行整个图像序列的平差计算,计算量小,但受到出格点(误配)影响大,容易引入累积误差。从研究发展趋势来看,这两种方法的结合将有可能获得鲁棒性、实时性较好的三维重构方法。

由于自标定方法一般采用相机线性模型或简化模型,不能准确描述真实的几何成像关系,远离中心处的图像畸变量较大,对三维重构精度影响很大<sup>[38]</sup>,我们的实验(见图 4)也验证了这一点。图 4(a)显示了选取的鼠标匹配点,图 4(b)为相机自标定重构结果,图 4(c)和(d)为相机标定情况下重构结果的网格和插值效果。因此有必要对自标定重构结果进行非线性优化,或者在重构过程中采用相机非线性模型。

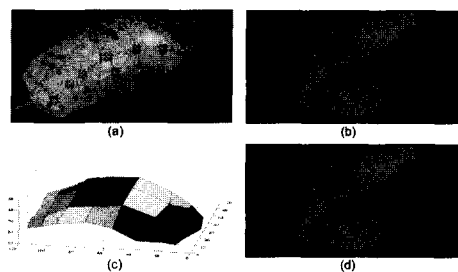


图 4 一个鼠标三维重构实验

## 4 应用中存在的问题和发展前景

上述的研究成果,既是今后研究的理论基础,也有许多不完善的地方,这将为寻找新的技术和方法解决实际应用存在的问题指明方向。

1. 由三维景物到二维图像的过程不仅是射影几何框架下的一种降维几何映射,而且是许多因素的函数,例如景物的几何特征(形状、方位)、物理特征(材料性质、纹理、颜色、光照)以及相机参数等。从二维图像信息反推三维信息的三维重构技术是建立在对多视图几何的理解和建模基础上,是一个复杂的、病态的多参数估计逆问题,且对噪声或离散化等多种因素引起的误差极其敏感。因此,借鉴交叉学科相关技术,改进三维重构的关键算法—图像匹配和摄像机标定和自标定算法的着眼点应该是优化方法、准则的寻求和约束条件的确定。

2. 相机标定和自标定的理论研究已基本成熟, 标定方法精度高, 而自标定方法使用灵活。在应用上, 标定方法的选择取决于实际使用的场合和精度需求。在研究方面, 相机标定方法的使用灵活性和操作过程需要进一步提高和简化, 尤其是相机的外部参数标定, 而相机自标定方法需要对自标定的结果或者过程进行非线性优化。

3. 至今为止, 匹配仍是计算机视觉领域的一个瓶颈问题。如何克服几何失真、畸变、噪声、特殊结构(平坦区域、重复相似结构等)及遮挡等等, 这些都是在理论上和技术上亟待解决的问题。多幅图像的对应点匹配, 还需要人机对话、人工参与选择、修改配对, 因此全自动匹配问题将是一个很有前景的课题, 也是很有挑战性的项目。如何利用较少的特征点阵, 通过图形学中的网格细分技术来进行景物表面的三维重构, 也将是未来的研究方向之一。

4. 在计算机视觉领域, 基础矩阵占有非常重要的地位, 基础矩阵的计算精度和速度决定了后续应用中的许多其他算法的精度和速度。目前算法中, 线性方法计算简单、速度快, 但精度低; 鲁棒估计方法<sup>[39]</sup>适用性强, 能够对付各种不利因素的干扰, 具有较高的精度, 但计算繁琐。提出更好的鲁棒性准则, 剔除异常数据, 进一步提高鲁棒性, 并简化计算过程, 提升计算速度, 将是未来研究的重点。

5. 目前三维重构是以图形重构为主, 全像素重构将是未来可选的研究方向之一。尽管在许多场合有三维图形的重构足以能说明问题, 但在更广泛的应用中(如虚拟现实), 全像素的重构有时是必需的。但多幅图像中像素点的密集匹配、多种图像缺陷和计算量庞大等许多问题有待解决。

6. 与传统主动三维重构相比, 虽然被动视觉图像三维重构具有更广泛的使用范围和使用灵活性, 但重构的精度仍然比传统方法要差一些。影响重构精度的原因有很多, 包括相机标定误差、匹配误差、噪声误差、量化误差、畸变误差、立体模型误差等等, 因此需要进行精密的误差分析、整定和补偿。另一方面, 多种重构方法的综合<sup>[40]</sup>将会获得更为广阔的应用空间。

**结束语** 三维重构有着广阔的应用前景, 也是目前的一个研究热点。由于涉及较多研究领域, 在解决具体实际问题时没有一个通用的思路作参考。本文选取了近几年来的一些重要研究成果, 对涉及到的关键技术即相机标定、对应点匹配和重构计算的研究现状进行了探讨, 介绍了一些常用方法, 总结了三维重构计算的一般性框架。由于重构过程中的误差控制至今还没有得到很好地解决, 通用的匹配算法还没找到, 并且实时性也不好, 因此三维重构要取得突破性的进展, 还有很艰巨的任务。文本还就实际应用中的难点问题提出了一些研究观点和方法, 希望能对相关领域的研究人员和工程技术人员提供有益的帮助。

## 参 考 文 献

[1] Remondino F, El-Hakim S. Critical overview of image-based 3D modeling[EB/OL]. <http://www.photogrammetry.ethz.ch>

[2] 刘钢, 彭群生, 鲍虎军. 基于图像建模技术研究综述与展望[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(1): 18-26

[3] Xu Gang, Zhang Zhengyou. Epipolar Geometry in Stereo, Motion and Object Recognition; A Unified Approach[M]. Kluwer Academic Publishers, 1996

[4] Zhang Z. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[A]//IEEE Conf. 7th ICCV[C]. Greece;

Corfu, 1999; 666-673

[5] Hartley R, Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision[M]. 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 2004

[6] Faugeras O D. Three-dimensional Computer Vision [M]. the MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1993

[7] 杨必武, 郭晓松. 摄像机镜头非线性畸变校正方法综述[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(3): 269-274

[8] 孟晓桥, 胡占义. 摄像机自标定方法的研究与进展[J]. 自动化学报, 2003, 29(1): 110-124

[9] Liebowitz D, Zisserman A. Metric Rectification for Perspective Images of Planes[A]//IEEE Conf. CVPR[C]. 1998; 482-488

[10] Cao X, Foroosh H. Camera Calibration Using Symmetric Objects [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(11): 3614-3619

[11] Tian Dongping, Shu Yuan, Tan Zheng. 3D reconstruction using spatial orthogonal constraints[A]. ICARCV[C], 2004, 2: 1092-1097

[12] 舒远, 谈正, 丁礼儒. 利用空间正交约束的相机自标定和三维重构[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(2): 138-141

[13] Zhang Yanqing, Wang Zhiyan, Wang Bin. A Camera Calibration Method Based on Nonlinear Model and Improved Planar Pattern [A]//Proceeding of 8th JCIS/CVPRIP[C]. 2005(1/3): 707-712

[14] Zhang Yanqing, Wang Zhiyan. A Flexible Camera Calibration Method for Computer Visual 3D Reconstruction System[A]//IEEE Proceedings of 8th ICSP[C]. 2006(1/4): 1580-1583

[15] Zhang Yanqing, Wang Zhiyan. A New Approach for Nonlinear Distortion Correction in Computer Vision Images[A]//Proceeding of JCIS/CVPRIP[C]. 2005(1/3): 640-643

[16] Xu Xiaowei, Wang Zhiyan, Zhang Yanqing, et al. A Method of Multi-view Vehicle License Plates Location Based on Rectangle Features[A]//IEEE Proceedings of 8th ICSP[C]. 2006(1/4): 2131-2134

[17] 张艳青. 典型三维实体数码成像重建建模[D]. 广州: 华南理工大学, 2005

[18] Sonka M, Hlavac V, Boyle R. Image Processing, Analysis, and Machine Vision[M]. Thomson books cole press, 2002

[19] 章权兵, 罗斌, 韦穗, 等. 基于仿射变换模型的图象特征点集配准方法研究[J]. 中国图象图形学报, 2003, 8(10): 1121-1125

[20] Sun J, Zheng N N, H Y. Shum matching using belief propagation [J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(7): 787-800

[21] Fitzgibbon A W. Robust registration of 2D and 3D point sets [J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(12/13): 1145-1153

[22] Rastgar H, Ahmadi M, Sid-Ahmed M. 3D Position Sensing using a Hopfield Neural Network Stereo Matching Algorithm [A]. IEEE ISCAS[C], 2006: 3638-3641

[23] Lourakis L, Deriche R. Camera self-calibration using the svd of the fundamental matrix: From point correspondences to 3D measurements[R]. Tech. Rep. 3748. INRIA, 1999

[24] Triggs B. Auto-calibration and the absolute quadric[A]//Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition[C]. 1997; 609-614

[25] Heyden A, Strom K A. Euclidean reconstruction from image sequences with varying and unknown focal length and principal point[A]. ICVR[C], 1997; 438-443

[26] 章权兵, 王海贤, 韦穗. 线性多视图重构的新算法[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(10): 1210-1215

[27] Wu Yihong, Zhu Haijiang, Hu Zhanyi, et al. Camera Calibration from the Quasi-affine Invariance of Two Parallel Circles[A]. ECCV[C], 2004; 190-202

[28] 张维勇, 王征, 翟鸣, 等. 基于射影不变量的摄像机自标定方法[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(11): 1432-1435

[29] 杨敏, 沈春林. 未标定单幅结构场景图像的三维重构[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(4): 456-459

[30] Delage E, Lee H, Ng A Y. A dynamic Bayesian network model f-

or autonomous 3d reconstruction from a single indoor image[A] //CVPR'06[C]. 2006,2:2418-2428

[31] L' P E, opez-de-Teruel, Ruiz A, et al. Efficient Monocular 3D Reconstruction from Segments for Visual Navigation in Structured Environments[A]//ICPR'06[C]. 2006,1:143-146  
 [32] 冯志全,孟祥旭,李学庆,等. 基于单目体系的可见手重构算法研究[J]. 计算机学报,2006,29(3):448-456  
 [33] 侯志强,韩崇昭. 视觉跟踪技术综述[J]. 自动化学报,2006,32(4):603-617  
 [34] Chang M M Y, Wong K H. Model and pose acquisition using extended Lowe's method[J]. IEEE Trans. Multimedia, 2005, 7(2):253-260  
 [35] Costeira J, Kanade T. A multibody factorization method for independently moving objects[J]. Int. J. Comput. Vision, 1998, 29(3):159-179

[36] Chiuso A, Favaro P, Jin H, et al. Structure from motion causally integrated over time[J]. IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell, 2002, 24(4):523-535  
 [37] Yu Ying Kin, Wong Kin Hong, Chang M M Y. Recursive Three-Dimensional Model Reconstruction Based on Kalman Filtering [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B, 2005, 35(3):587-592  
 [38] 孙凤梅,胡占义. 摄像机简化模型对三维重构的影响——分析与实验[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(10):2257-2262  
 [39] 宋汉辰,张小义,吴玲达. 一种基础矩阵线性估计的鲁棒方法[J]. 软件学报, 2005, 31(15):178-185  
 [40] Sabry F, El-Hakim, Angelo Beraldin J, et al. Detailed 3D Reconstruction of Large-Scale Heritage Sites with Integrated Techniques[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2004, 3: 21-29

(上接第 182 页)

(9)对上述资源分配的序列,计算出资源的分配效率  $k$ 。

为了进行比较,本文假设资源与服务构成  $n \times n$  矩阵,  $n$  分别选取 5, 10, 15, 20。常数  $g_1=2000, g_2=1$ , 矩阵由 Matlab 随机产生。对上述三种调度方案,进行收益与资源效益的比较。结果如图 3, 可见, Market-Semantic 调度的用户收益最大, Max-Semantic 调度的用户收益比 Semantic-Cost-Max-Min 调度的要大, Semantic-Cost-Max-Min 调度用户的收益最小。从图 4 可见, Market-Semantic 调度的资源使用效率最高, 其值为 1, Semantic-Cost-Max-Min 的资源使用效率比 Max-Semantic 的大, 而 Max-Semantic 的资源使用率最低。这说明, Market-Semantic 能够在提供用户最大收益的同时, 即提供满意服务的同时, 资源的使用效率也最高。

$n=5$  时, 本体相似度矩阵  $s$  及服务代价矩阵  $c$  分别为

$$s = \begin{bmatrix} 0.0002, 0.0005, 0.0002, 0.0001, 0.0003 \\ 0.0005, 0.0001, 0.0009, 0.0008, 0.0007 \\ 0.0007, 0.0006, 0.0001, 0.0000, 0.0003 \\ 0.0009, 0.0004, 0.0010, 0.0003, 0.0001 \\ 0.0004, 0.0002, 0.0007, 0.0005, 0.0004 \end{bmatrix}$$

$$c = \begin{bmatrix} 0.24, 0.56, 0.66, 0.31, 0.42 \\ 0.21, 0.42, 0.56, 0.35, 0.44 \\ 0.47, 0.24, 0.46, 0.56, 0.23 \\ 0.27, 0.21, 0.32, 0.44, 0.51 \\ 0.53, 0.42, 0.51, 0.44, 0.32 \end{bmatrix}$$

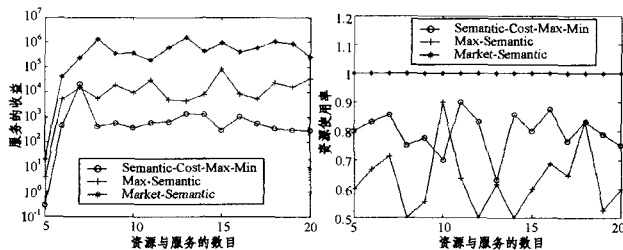


图 3 收益比较图

图 4 资源使用率比较

法。然而以下主要问题需要进一步研究: 如何更好地进行本体语义相似测量, 是 Market-Semantic 的关键; 如何更好地确定效用函数, 把语义与用户偏好更好地结合起来; 如何更好地确定资源的价格。虽然把服务执行的时间对应为成本和价格在理论上是可行的, 但是如何准确估计服务完成的准确时间, 如何更加科学地确定价格, 需要更多的研究。

### 参考文献

[1] Hong Suda. Ontology Based Resource Matching in the grid—The Grid Meets the Semantic Web // Proceedings of the Second International Semantic Web Conference. Sanibel-Captiva Islands, Florida, USA, October 2003  
 [2] Liu, Foster I. A Constraint Language Approach ToGrid ResourceSelection // Proceedings of the Twelfth IEEE International Symposium on High Performance Distributed Computing (HPDC-12). June 2003  
 [3] Wache H, Vogeel T, Visser U, et al. Ontology-Based Integration of Information—A Survey of Existing Approaches // Proc. of the IJCAI-01 Workshop: Ontologies and Information Sharing. Seattle, WA, 2001:108-117  
 [4] Li Lei, Horrocks I. A Software Framework for Matchmaking Based on Semantic Web Technology // Proceedings of the Twelfth International World Wide Web Conference (WWW2003). 2003  
 [5] Paolucci M. Semantic Matching of Web Service Capabilities // Proceedings of the First International Semantic Web Conference (ISWC) 2002. 2003  
 [6] Solomon M. Matchmaking Distributed Resource Management for High Throughput Computing [C] // Proceedings of the Seventh IEEE International Symposium on High Performance Distributed Computing. Chicago, July 1998  
 [7] Solomon M, Raman R. Resource Management through Multilateral Matchmaking // Proceedings of the Ninth IEEE Symposium on High Performance Distributed Computing (HPDC9). Pittsburgh, August 2000; 290-291  
 [8] Bianchini D. Hybrid Ontology Based Matchmaking for Service Discovery // Proceedings of the 2006 ACM symposium on Applied computing. 2006; 1707-1708  
 [9] 吴健, 吴朝晖, 李莹. 基于本体论和词汇语义相似度的 Web 服务发现. 计算机学报, 2005(4): 166-173  
 [10] Weinstein P, Birmingham W. Comparing concepts in differentiated ontologies. // Proc. of KAW-99. 1999  
 [11] 易纲, 海闻. 微观经济学. 上海人民出版社, 2003: 185-201  
 [12] 曹鸿强, 肖依. 一种基于市场机制的计算网格资源分配方法. 计算机研究与发展, 2002(8)  
 [13] 鲁昌, 许永国. 一般均衡理论. 上海财经大学出版社, 2001  
 [14] 何坚勇. 最优化方法. 清华大学出版社, 2007