



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200810122626.4

[45] 授权公告日 2010年1月27日

[11] 授权公告号 CN 100585637C

[22] 申请日 2008.6.3

[21] 申请号 200810122626.4

[73] 专利权人 东南大学

地址 210096 江苏省南京市四牌楼2号

[72] 发明人 达飞鹏 傅有成 邢德奎 马倩倩

[56] 参考文献

CN101131728A 2008.2.27

CN1940996A 2007.4.4

US2007/0201750A1 2007.8.30

基于双目立体视觉的人脸三维重建方法的研究. 潘岩. 中国优秀硕士学位论文全文数据库. 2006

利用立体图对的三维人脸模型重建算法. 沈晔湖. 计算机辅助设计与图象学学报, 第18卷第12期. 2006

审查员 李芳

[74] 专利代理机构 南京经纬专利商标代理有限公司

代理人 陆志斌

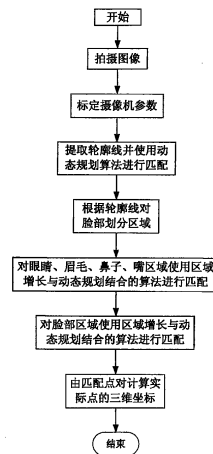
权利要求书3页 说明书13页 附图8页

[54] 发明名称

一种基于立体匹配的人脸三维模型获取方法

[57] 摘要

一种基于立体匹配的人脸三维模型获取方法, 其实现步骤为: (1) 使用两台摄像机从两个不同角度同时各拍摄人脸的一幅图像, 任取其中一幅为基准图像, 另一幅为对准图像; (2) 分别对两台摄像机进行标定; (3) 从基准图像中提取脸和眼睛、眉毛、鼻子、嘴的轮廓线, 使用动态规划算法对轮廓线上的所有像素点进行匹配, 并根据已匹配的轮廓线将基准图像中的人脸划分为眼睛、眉毛、鼻子、嘴7个待匹配区域; (4) 从每个待匹配区域的外边缘线开始, 向区域内部, 使用区域增长与动态规划相结合的算法, 对基准图像中的待匹配像素点进行匹配; (5) 根据摄像机参数计算匹配点对所对应的人脸上实际点的三维坐标, 进而得到整个人脸的三维点云数据。



1、一种基于立体匹配的人脸三维模型获取方法，其特征在于：

步骤 1：使用两台摄像机从两个不同角度同时各拍摄人脸的一幅图像，任取其中一幅为基准图像，另一幅为对准图像，

步骤 2：分别对两台摄像机进行标定，获得各自的内参数矩阵 A_L 、 A_R 和外参

数矩阵 $[R_L T_L]$ 、 $[R_R T_R]$ ，内参数矩阵 $A = \begin{bmatrix} f_x & s & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ ，其中 f_x, f_y 分别表示 u

轴和 v 轴的尺度因子，又称有效焦距， s 表示 u 轴和 v 轴轴间不垂直因子， (u_0, v_0)

表示以像素为单位的图像的主点坐标，也称光学中心，外参数矩阵 $[R T]$ 中 R 为旋转参数矩阵， T 为平移参数矩阵，

步骤 3：从基准图像中提取脸和眼睛、眉毛、鼻子、嘴的轮廓线，使用动态规划算法对轮廓线上的所有像素点进行匹配，并根据已匹配的轮廓线将基准图像中的人脸划分为 7 个区域：

步骤 3.1：从基准图像中提取脸和眼睛、眉毛、鼻子、嘴的连续的封闭的单个像素宽度的轮廓线，

步骤 3.2：分别将步骤 3.1 提取出的基准图像中的每一条轮廓线作为动态规划算法的路径，使用动态规划算法，找到这些轮廓线上的每一个像素点对准图像中对应的匹配点，

把为基准图像中的像素点对准图像中找到对应匹配点的过程称为匹配过程，把已经在对准像图像中找到对应匹配点的基准图像中的像素点称为已匹配点，把还没有在对准图像中找到对应匹配点的基准图像中的像素点称为待匹配点，把基准图像中完全由待匹配点组成的区域称为待匹配区域，

步骤 3.3：在基准图像中，把眼睛轮廓线包围的区域称为眼睛区域，把眉毛轮廓线包围的区域称为眉毛区域，把鼻子轮廓线包围的区域称为鼻子区域，把嘴轮廓线包围的区域称为嘴区域，把脸部轮廓线所包围的除去眼睛、眉毛、鼻子、嘴区域以外的区域为脸部区域，这些区域均为待匹配区域，相互之间被由已匹配点组成的轮廓线分隔开，

步骤 4：在基准图像中，对眼睛待匹配区域、眉毛待匹配区域、鼻子待匹配

区域、嘴待匹配区域，从每个待匹配区域的外边缘线开始，向区域内部，使用区域增长与动态规划相结合的算法，对区域内的待匹配像素点进行匹配：

步骤 4.1：在基准图像中选取鼻子待匹配区域的连续的单像素宽度的外边缘线 l ，

步骤 4.2：对外边缘线 l 上的每一个像素点 p_k ， $k=1,2,3,\dots,K$ ， K 为 l 上的像素点数，选取所有与 p_k 相邻的已匹配点 S_{Lm} ， $m=1,2,3,\dots,M$ ， M 为与 p_k 相邻的已匹配点数，令 S_{Lm} 与 S_{Lm} 在对准图中的匹配点 S_{Rm} 组成种子点对，根据区域增长算法原理，确定 p_k 在对准图中的匹配点的搜索范围，

步骤 4.3：以 l 为动态规划算法的路径，使用动态规划算法，对 l 上的每一点 p_k ，在对准图中已确定的搜索范围内寻找对应的匹配点，完成 l 的匹配，

步骤 4.4：重复执行步骤 4.1、4.2、4.3，为基准图像中鼻子待匹配区域内的所有像素点在对准图像中找到对应的匹配点，

步骤 4.5：对眼睛待匹配区域、眉毛待匹配区域、嘴待匹配区域执行步骤 4.1、4.2、4.3、4.4，为基准图像中眼睛待匹配区域、眉毛待匹配区域、嘴待匹配区域内的所有像素点在对准图像中找到对应的匹配点，

步骤 5：在基准图像中，从脸部待匹配区域的外边缘线开始，向区域内部，使用区域增长与动态规划相结合的算法，对基准图像中脸部待匹配区域内的像素点进行匹配，

随着匹配过程的进行，脸部待匹配区域不断向区域内部收缩，区域的外边缘会与眼睛、眉毛、鼻子、嘴的轮廓线相遇，据此将匹配过程分为两个阶段：从匹配过程开始直到脸部待匹配区域外边缘与眼睛、眉毛、鼻子、嘴的轮廓线中的任意一条相遇为第一阶段，从脸部待匹配区域外边缘与眼睛、眉毛、鼻子、嘴的轮廓线中的任意一条相遇之后直到整个匹配过程完成成为第二阶段，

步骤 5.1：在第一阶段中，在基准图像中直接选取脸部待匹配区域的连续的单像素宽度的外边缘线 l ，在第二阶段中，脸部待匹配区域外边缘与眼睛、眉毛、鼻子、嘴的轮廓线相遇后，以遇到的轮廓线为脸部待匹配区域的边界的一部分，与原有边界一起形成了新的脸部待匹配区域边界，沿着新的边界选取脸部待匹配区域的连续的单像素宽度的外边缘线 l ，

步骤 5.2：与步骤 4.2 相同，

步骤 5.3：与步骤 4.3 相同，

步骤 5.4：重复执行步骤 5.1、5.2、5.3，为基准图像中脸部待匹配区域内

的所有像素点在对准图像中找到对应的匹配点，

步骤 6：将每个基准图像中的像素点和该像素点在对准图像中对应的匹配点合称为一个匹配点对，根据步骤 1 得到的两台摄像机的内参数矩阵 A_L 、 A_R 和外参数矩阵 $[R_L T_L]$ 、 $[R_R T_R]$ ，计算步骤 4 和步骤 5 得到的匹配点对所对应的人脸上的实际点的三维坐标，进而得到整个人脸的三维点云数据。

一种基于立体匹配的人脸三维模型获取方法

技术领域：

本发明属于双目立体视觉的技术领域，涉及到基于立体匹配的人脸三维模型获取问题，尤其涉及一种使用区域增长与动态规划相结合的算法，结合人脸特征信息，获取人脸三维点云模型的方法。

背景技术：

立体匹配技术是一种被动三维测量技术，通过建立两幅从不同角度拍摄的被测物体图像的像素点之间的对应关系恢复被测物体的三维信息。立体匹配技术可以获得被测物体的稠密的三维点云数据，无需向被测物体投影光栅，自动化程度较高，并且可以实现实时采集。在三维人脸重建领域中，立体匹配是较为常用的一种技术。

立体匹配算法可以分为局部最优算法和全局最优算法两大类。局部最优算法基于区域相关，使用灰度相似性约束、唯一性约束、视差连续性约束、顺序一致性约束等等约束，算法简单，运算速度快。但是由于这些约束作用范围都仅限于图像的局部区域，获得的结果可能只是局部最优而非全局最优。全局最优算法则是引入了全局最优搜索策略，即在算法中加入全局性约束条件，避免了局部极值的困扰。这些约束条件一般以能量函数最小化的形式体现。全局最优算法匹配准确度高，但算法复杂，运算速度慢。

在众多立体匹配技术算法中，区域增长算法和动态规划算法是在实际场合中使用较多、效果较好的两种。

区域增长算法属于局部最优算法，利用连续性约束，将匹配关系从种子点对传播至图像的其余部分。与传统的逐点独立计算的方法相比，区域增长算法极大地提高了匹配的效率和精度，并且由于加入了连续性约束，对连续表面的匹配效果也更好。

动态规划算法属于全局最优算法，将匹配过程看成是在左右图像对应扫描线上寻找最小化全局能量函数路径的过程，规划出的路径由趋向于具有最小化全局能量函数值的匹配点的集合构成，即正确匹配点集合。动态规划法是全局最优算

法中效率较高、匹配效果较好的一种方法。

但是区域增长算法和动态规划算法存在一些共同的缺点：

- (1) 它们虽然引入了平滑约束，但是都只能在一个方向上实现平滑。区域增长算法只在每个种子点的增长方向上限制搜索范围，而由不同种子点增长出的点、以及同一种子点位于不同增长方向上的点之间相互没有任何约束。动态规划算法中的平滑约束只在规划路径上即同一条扫描线上有效，不同扫描线之间同样没有约束。这种一维的平滑约束效果有限，容易出现错位、拉丝等现象。
- (2) 缺少对方向的控制。由于图像本身特性分布不均匀，采用不同的增长方向和规划路径，匹配结果也会有比较大的差别。因此区域增长的方向和动态规划的路径是影响最终结果的一个重要因素。但在这两种算法中缺少对这一因素的考虑。
- (3) 两种算法都存在错误传播的情况。一旦增长的过程中或者动态规划的路径中出现错误的匹配点，就很可能影响到后续的匹配，使错误向下传播。
- (4) 在实际应用于三维人脸模型重建时，人脸的一些特征信息是可以用于辅助匹配的。但这两种算法都无法使用这些辅助信息，造成信息的浪费。

由于存在以上缺点，区域增长算法和动态规划算法实际应用于三维人脸模型重建中的效果不能令人满意。

发明内容

针对现有技术所存在的缺点和限制，本发明的目的在于提供一种结合区域增长算法和动态规划算法并辅助以人脸特征信息的基于立体匹配的人脸三维模型获取方法。

本发明采用如下技术方案：对从两个不同角度拍摄的两幅人脸图像，任取其中一幅为基准图像，另一幅为对准图像；首先在基准图像中提取脸和眼睛、眉毛、鼻子、嘴的连续的封闭的单像素宽度的轮廓线，使用动态规划算法为轮廓线上的每一点在对准图像中找到相应的匹配点，即对轮廓线进行匹配，并根据这些已匹配的轮廓线将基准图像中的人脸划分为若干个待匹配区域；然后从这些待匹配区域的外边缘线开始，向待匹配区域的内部，使用区域增长与动态规划相结合的算

法，为基准图像中人脸的所有像素点在对准图像中找到对应的匹配点；最后根据摄像机参数计算匹配点对所对应的人脸上实际点的三维坐标，得到整个人脸的三维点云数据。

本发明的方法具体包括以下几个步骤：

步骤 1：使用两台摄像机从两个不同角度同时各拍摄人脸的一幅图像，任取其中一幅为基准图像，另一幅为对准图像，

步骤 2：分别对两台摄像机进行标定，获得各自的内参数矩阵 A_L 、 A_R 和外参数矩阵 $[R_L T_L]$ 、 $[R_R T_R]$ ，

步骤 3：从基准图像中提取脸和眼睛、眉毛、鼻子、嘴的轮廓线，使用动态规划算法对轮廓线上的所有像素点进行匹配，并根据已匹配的轮廓线将基准图像中的人脸划分为 7 个区域：

步骤 3.1：从基准图像中提取脸和眼睛、眉毛、鼻子、嘴的连续的封闭的单像素宽度的轮廓线，

步骤 3.2：分别将步骤 3.1 提取出的基准图像中的每一条轮廓线作为动态规划算法的路径，使用动态规划算法，找到这些轮廓线上的每一个像素点在对准图像中对应的匹配点，

把为基准图像中的像素点在对准图像中找到对应匹配点的过程称为匹配过程，把已经在对准像图像中找到对应匹配点的基准图像中的像素点称为已匹配点，把还没有在对准图像中找到对应匹配点的基准图像中的像素点称为待匹配点，把基准图像中完全由未匹配点组成的区域称为待匹配区域，

步骤 3.3：在基准图像中，把眼睛轮廓线包围的区域称为眼睛区域，把眉毛轮廓线包围的区域称为眉毛区域，把鼻子轮廓线包围的区域称为鼻子区域，把嘴轮廓线包围的区域称为嘴区域，把脸部轮廓线所包围的除去眼睛、眉毛、鼻子、嘴区域以外的区域为脸部区域，这些区域均为待匹配区域，相互之间被由已匹配点组成的轮廓线分隔开，

步骤 4：在基准图像中，对眼睛待匹配区域、眉毛待匹配区域、鼻子待匹配区域、嘴待匹配区域，从每个待匹配区域的外边缘线开始，向区域内部，使用区域增长与动态规划相结合的算法，对区域内的待匹配像素点进行匹配：

步骤 4.1：在基准图像中选取鼻子待匹配区域的连续的单像素宽度的外边缘线 l ，

步骤 4.2: 对外边缘线 l 上的每一个像素点 p_k , $k=1,2,3,\dots,K$, K 为 l 上的像素点数, 选取所有与 p_k 相邻的已匹配点 S_{Lm} , $m=1,2,3,\dots,M$, M 为与 p_k 相邻的已匹配点数, 令 S_{Lm} 与 S_{Rm} 在对准图中的匹配点 S_{Rm} 组成种子点对, 根据区域增长算法原理, 确定 p_k 在对准图中的匹配点的搜索范围,

步骤 4.3: 以 l 为动态规划算法的路径, 使用动态规划算法, 对 l 上的每一点 p_k , 在对准图中已确定的搜索范围内寻找对应的匹配点, 完成 l 的匹配,

步骤 4.4: 重复执行步骤 4.1、4.2、4.3, 为基准图像中鼻子待匹配区域内的所有像素点在对准图像中找到对应的匹配点,

步骤 4.5: 对眼睛待匹配区域、眉毛待匹配区域、嘴待匹配区域执行步骤 4.1、4.2、4.3、4.4, 为基准图像中眼睛待匹配区域、眉毛待匹配区域、嘴待匹配区域内的所有像素点在对准图像中找到对应的匹配点,

步骤 5: 在基准图像中, 从脸部待匹配区域的外边缘线开始, 向区域内部, 使用区域增长与动态规划相结合的算法, 对基准图像中脸部待匹配区域内的像素点进行匹配,

随着匹配过程的进行, 脸部待匹配区域不断向区域内部收缩, 区域的外边缘会与眼睛、眉毛、鼻子、嘴的轮廓线相遇, 据此将匹配过程分为两个阶段: 从匹配过程开始直到脸部待匹配区域外边缘与眼睛、眉毛、鼻子、嘴的轮廓线中的任意一条相遇为第一阶段, 从脸部待匹配区域外边缘与眼睛、眉毛、鼻子、嘴的轮廓线中的任意一条相遇之后直到整个匹配过程完成成为第二阶段,

步骤 5.1: 在第一阶段中, 在基准图像中直接选取脸部待匹配区域的连续的单像素宽度的外边缘线 l , 在第二阶段中, 脸部待匹配区域外边缘与眼睛、眉毛、鼻子、嘴的轮廓线相遇后, 以遇到的轮廓线为脸部待匹配区域的边界的一部分, 与原有边界一起形成了新的脸部待匹配区域边界, 沿着新的边界选取脸部待匹配区域的连续的单像素宽度的外边缘线 l ,

步骤 5.2: 与步骤 4.2 相同,

步骤 5.3: 与步骤 4.3 相同,

步骤 5.4: 重复执行步骤 5.1、5.2、5.3, 为基准图像中脸部待匹配区域内的所有像素点在对准图像中找到对应的匹配点,

步骤 6: 将每个基准图像中的像素点和该像素点在对准图像中对应的匹配点合称为一个匹配点对, 根据步骤 1 得到的两台摄像机的内参数矩阵 A_L 、 A_R 和外参数矩阵 $[R_L T_L]$ 、 $[R_R T_R]$, 计算步骤 4 和步骤 5 得到的匹配点对所对应的人脸

上的实际点的三维坐标，进而得到整个人脸的三维点云数据。

与现有技术相比，本发明具有如下优点：

- (1) 将区域增长和动态规划两种算法分别加以改进并结合，在两个接近垂直的方向上分别同时进行区域增长和动态规划，两种算法的优势叠加，实现了两维的平滑约束，相较于原来单一方向的平滑约束，效能明显加强，匹配准确度更高。同时两种方法相互之间形成一种约束关系，也抑制了错误匹配的产生。
- (2) 将图像划分为若干区域，匹配关系由区域边缘向内部逐圈地传播，相比于传统区域增长算法中匹配关系由散乱的种子点向四周自由扩散，本发明的算法实现了对运算方向的控制。通过调整初始区域的位置和形状，可以有效地控制后续匹配运算中区域增长的方向和动态规划的路径，使整体匹配运算的方向和图像特性分布相贴合，达到更好的效果。
- (3) 根据脸和脸部器官的自然轮廓划分区域，令匹配运算沿着人脸表面自然变化的方向进行，将人脸特征信息加入了匹配，提高了在人脸三维模型获取这个特定应用中的信息的利用率，进一步提高了匹配的准确度。

附图说明

图 1 本发明完整流程图。

图 2 系统模型示意图。

图 3 基于灰度相似性的立体匹配算法的基本原理示意图

图 4 区域增长算法中匹配关系从种子点向四周传播的基本策略示意图。

图 5 区域增长算法中由多对种子点共同确定当前点搜索范围的示意图。

图 6 动态规划算法基本原理示意图。

图 7 动态规划算法中每一级的运算过程示意图。

图 8 传统动态规划算法的路径选取的示意图。

图 9 获取人脸图像示意图。

图 10 根据轮廓线为脸部划分区域示意图。

图 11 选取待匹配区域边缘线示意图。

图 12 由种子点对确定 l 上一点 P_{Li} 在对准图像中对应匹配点搜索范围示意图。

图 13 鼻子区域的运算方向示意图。

图 14 脸部区域的两个运算阶段示意图。

图 15 由匹配点对和摄像机内外参数使用空间交汇法计算对应物点的三维坐标示意图。

具体实施方式

下面参照附图，对本发明具体实施方案做出更为详细的描述。

图 1 为本发明的完整流程图。

图 2 为本发明的系统模型的示意图。使用两台摄像机从两个不同角度同时各拍摄人脸的一幅图像， O_L 、 O_R 分别为两台摄像机的光心， S_L 、 S_R 分别为两台摄像机的成像平面， P 为被测人脸上的一个点， P_L 、 P_R 为物点 P 分别在两台摄像机成像平面上所成的像点。称这种由同一物点在不同摄像机中所成的像点相互为匹配点。任取其中一幅图像为基准图像，另一幅为对准图像，为基准图像中的像素点，在对准图像中搜索对应的匹配点，这个过程称为立体匹配。由匹配点对，根据系统模型，结合两台摄像机的内外参数，可以逆向运算，得到其对应的物点的空间三维坐标。对从两个不同角度拍摄的两幅人脸图像进行立体匹配运算，就可以得到整个人脸的三维点云模型。

图 3 所示为基于灰度相似性的立体匹配算法的基本原理。基于灰度相似性的立体匹配算法是绝大多数立体匹配算法的基础，通过比较两幅图像中像素点的一定邻域范围内的灰度分布之间的相似程度，来确定两幅图像中像素点的对应匹配关系。如图 3 所示，(a) 为基准图像，(b) 为对准图像，基准图像中， P_L 为一个像素点， W_L 为以 P_L 为中心的一个窗口区域；对准图像中，虚线框内区域为 P_L 的对应的匹配点的搜索范围， P_L 的匹配点一定在此范围内，搜索范围通常由一个固定的偏移量确定， P_{R_i} 为搜索范围中的一个像素点， W_{R_i} 为以 P_{R_i} 为中心的一个与 W_L 同样大小的窗口区域。 W_L 、 W_{R_i} 称为模板窗。对搜索范围内的每一个像素点 P_{R_i} ，计算模板窗 W_L 和 W_{R_i} 之间的相似度函数值 ρ 。常用的相似度函数有归一化互相关系数 (normalized correlation coefficient) 和差值平方和 (Sum of Squared Difference, SSD)，分别如式(1)和式(2)所示：

$$\rho(x, y) = \frac{\sum_{(x_L, y_L) \in W_L, (x_R, y_R) \in W_R} [I_L(x_L, y_L) - \bar{I}_L][I_R(x_R, y_R) - \bar{I}_R]}{\sqrt{\sum_{(x_L, y_L) \in W_L} [I_L(x_L, y_L) - \bar{I}_L]^2 \sum_{(x_R, y_R) \in W_R} [I_R(x_R, y_R) - \bar{I}_R]^2}} \quad (1)$$

$$\rho(x, y) = \sum_{(x_L, y_L) \in W_L, (x_R, y_R) \in W_R} [I_L(x_L, y_L) - I_R(x_R, y_R)] \quad (2)$$

根据相似度函数的不同，选取搜索范围内 ρ 最大或最小的像素点 P_R 为 P_L 在对准图像中的匹配点。若相似度函数为归一化互相关系数，则取 ρ 最大的像素点为匹配点；如果相似度函数为差值平方和，则取 ρ 最小的像素点为匹配点。

图 4、图 5 为基于区域增长的立体匹配算法的原理示意图。

图 4 所示为区域增长算法中匹配关系从种子点向四周传播的基本策略。(a) 为基准图像，(b) 为对准图像， S_L 与 S_R 为基准图像与对准图像中的一对匹配点，称为种子点对， P_{L1} 和 P_{L2} 为基准图像中与 S_L 相邻的点，根据区域增长的思想， P_{L1} 和 P_{L2} 点的匹配点 P_{R1} 和 P_{R2} 必定在 S_L 的匹配点 S_R 附近， P_{R1} 和 P_{R2} 点的搜索范围就可以限制在 S_R 点的一个较小的邻域之内，图 4(b) 中两个粗线方框区域 W_{R1} 和 W_{R2} 即分别为 P_{R1} 和 P_{R2} 点的搜索范围。使用基于灰度相似性的立体匹配算法，在搜索范围内找到 P_{L1} 和 P_{L2} 的准确匹配点 P_{R1} 和 P_{R2} 。这是一个匹配关系从已匹配点向四周传播的过程，也是已匹配区域逐步增长扩大的过程。

图 5 为区域增长算法中由多对种子点共同确定当前点搜索范围的示意图。(a) 为基准图像，(b) 为对准图像， S_{L1} 和 S_{R1} ， S_{L2} 和 S_{R2} 是两对种子点对， P_L 为基准图像中与 S_{L1} 和 S_{L2} 相邻的点， W_{R1} 为对准图像中由 S_{R1} 确定的 P_L 匹配点的搜索范围， W_{R2} 为对准图像中由 S_{R2} 确定的 P_L 匹配点的搜索范围，则 P_L 在对准图像中的匹配点的搜索范围由 W_{R1} 和 W_{R2} 共同确定，即为图 5(b) 中所示的 W_{R1} 和 W_{R2} 的重叠区域 W_R 。

图 6-图 8 为基于动态规划的立体匹配的原理示意图。

动态规划算法将匹配过程看成是在图像中寻找最小化能量函数 $E(d)$ 路径的过程，规划出的路径由趋向于具有最小能量函数 $E(d)$ 的匹配点的集合构成，即正确匹配点集合。式 (3) 是一个典型的全局能量函数 $E(d)$ ：

$$E(d) = E_{data}(d) + \lambda E_{smooth}(d) \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 \text{其中} \quad E_{data}(d) &= \sum_{p \in V} m(d_p) \\
 E_{smooth}(d) &= \sum_{(p,q) \in V_1} s(d_p + d_q)
 \end{aligned}$$

式中：

d 为视差；

V 为所有像素点的集合， V_1 为所有相邻像素点对的集合；

$m(d_p)$ 为点 p 在视差为 d 时的匹配代价，代表该点的匹配程度，通常基于灰度相似性，值越小匹配度越高；

s 为相邻像素点 p 和 q 的视差 d_p 和 d_q 之差绝对值 $|d_p - d_q|$ 的一个单调递增函数，是这一对相邻点的平滑代价，代表这两点之间的平滑程度，值越小平滑程度越高；

$E_{data}(d)$ 为全局匹配代价，是所有像素点的匹配代价之和；

$E_{smooth}(d)$ 为全局平滑代价，是所有相邻像素点之间平滑代价之和；

λ 为权重系数。

动态规划算法的步骤为：

步骤 1：在基准图像中，选取一条由相邻的待匹配像素点组成的待匹配路径，确定路径上的每一点在对准图像中对应的匹配点的搜索范围。这个搜索范围通常是由一个预先设定的偏移量确定的，不过也可以通过其他算法获得。如图 6 所示，(a) 为基准图像，(b) 为对准图像， $p_i, i=1, 2, 3, \dots, N$ ，为基准图像中的相邻待匹配像素点，组成一条待匹配路径 l ， S_i 为 p_i 在对准图中的匹配点的搜索范围， q_{ij} 为 S_i 中的像素点。

步骤 2：将全局能量函数改写成递推形式，如式(4)所示：

$$E(d) = m(d_p) + \lambda s(d_p + d_{pb}) + \sum_{pc \in V_c} E_c(d_{pc}) \quad (4)$$

式中：

p 为当前像素点；

V_c 为 p 在动态规划路径中的所有子节点的集合；

pb 为 p 的父节点， pc 在动态规划路径中的子节点；

$m(d_p)$ 为点 p 在视差为 d 时的匹配代价， s 为相邻像素点 p 和 q 的平滑代价；

λ 为权重系数；

$E_c(d_{pc})$ 为 p 在动态规划路径中的子节点 pc 上的能量函数值。

步骤 3: 计算每一个节点与其父节点的取值之间的对应关系。自路径末端节点 p_N 向前至第二个节点 p_2 , 如图 7(1)-(3) 所示, 对其中每一个节点 p_i , 计算与其父节点 p_{i-1} 每一个可能取值所对应的本节点的取值, 具体作如下运算:

步骤 3.1: 对 p_i 父节点 p_{i-1} 的搜索范围内的每一个点 $q_{(i-1)k}$, 找到如果 $q_{(i-1)k}$ 为 p_{i-1} 的正确匹配点时, 那么 p_i 应该对应的匹配点。具体步骤如下: 首先计算 $q_{(i-1)k}$ 点视差 d_{i-1} , 然后:

步骤 3.1.1: 对 p_i 的搜索范围内的每一个点 q_{ij} , 计算视差 d_i , 根据 d_i 、 d_{i-1} 以及 p_i 所有子节点能量值之和 E_c , 按式(4) 计算从 p_N 开始到 p_i 为止的路径上的总的能量函数值 E_{ij} ;

步骤 3.1.2: 在所得的能量函数值 E_{ij} 找到最小值, 这个最小值对应所搜索范围中的点 q_{ij} , 即为如果 $q_{(i-1)k}$ 为 p_{i-1} 的正确匹配点时, p_i 所应该对应的匹配点 q_{Opt} ;

步骤 3.1.3: 重复步骤 3.1.1 和 3.1.2, 为 p_{i-1} 的搜索范围内的每一个点 $q_{(i-1)k}$ 找到一个对应的 p_i 最优取值 q_{Opt}

步骤 4: 对路径首节点 p_1 , 由于没有父节点, 式(4)简化为:

$$E(d) = m(d_p) + \sum_{pc \in V_c} E_c(d_{pc}) \quad (5)$$

对 p_1 的搜索范围内的每一个点 q_{1k} , 直接计算能量函数值 E_{1k} , 在所得能量函数值中找到最小值, 此最小值所对应的 q_{1k} , 即为 p_1 的匹配点;

步骤 5: 自第二个节点 p_2 向后至路径末端节点 p_N , 根据步骤 3 所得的子节点与父节点取值之间的对应关系, 直接得到每一个节点的匹配点。

在传统的动态规划算法中, 通常将图像的行扫描线选取为待匹配路径, 逐行匹配。如图 8 所示。

针对现有的区域增长和动态规划两种算法的缺陷, 我们提出了以下的改进思想:

首先, 不再使用传统区域增长算法中散乱分布的种子点, 这种散乱分布的种子点无法控制增长方向, 并且种子点和种子点之间、由种子点向不同方向增长出的匹配点之间相互没有联系, 缺少约束。取而代之的是对一个区域从边缘开始整

体向内部一圈一圈的增长,通过调整初始区域的位置、形状,可以有效地控制接下来增长的方向。

其次,传统区域增长算法仅仅是限定了匹配点的搜索范围,之后仍然使用最基本的基于灰度相关的匹配算法逐点匹配。而本发明在此基础上进一步将动态规划算法结合进来,将每一圈新增长的点看成一个整体,使用动态规划算法进行匹配。对于区域增长算法,后续的匹配运算得到了强化;对于动态规划算法,较小的搜索范围提供了一个更好的基础。从整体上看,则是在两个接近垂直的方向上同时实现平滑约束。

并且,在划分初始区域的时候,充分考虑到对人脸特征信息的利用,根据脸以及脸部器官的自然轮廓划分初始区域,令匹配运算沿着人脸表面自然变化的方向进行,进一步提高了匹配的准确度。

本发明的具体步骤如下:

步骤 1: 使用两台摄像机从两个不同角度同时各拍摄人脸的一幅图像,任取其中一幅为基准图像,另一幅为对准图像。如图 9 所示, C_L 和 C_R 为两台摄像机,令 C_L 拍摄的图像为基准图像, C_R 拍摄的图像为对准图像。

步骤 2: 分别对两台摄像机进行标定,获得各自的内参数矩阵 A_L 、 A_R 和外参

数矩阵 $[R_L \ T_L]$ 、 $[R_R \ T_R]$ 。内参数矩阵 $A = \begin{bmatrix} f_x & s & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, 其中 f_x, f_y 分别表示 u

轴和 v 轴的尺度因子, 又称有效焦距, s 表示 u 轴和 v 轴轴间不垂直因子, (u_0, v_0)

表示以像素为单位的图像的主点坐标, 也称光学中心。外参数矩阵 $[R \ T]$ 中 R 为旋转参数矩阵, T 为平移参数矩阵。

现在已有多种成熟有效的标定方法可以自由选用, 例如文献“*A Flexible New Technique for Camera Calibration*” (Zhang Z Y, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 20(11): 1330-1334) 提出一种被称为平面模板法的标定算法, 它主要是首先用理想针孔透视模型来线性求解摄像机的除畸变系数外的内外参数, 然后利用实际成像模型来求解畸变系数, 最后利用非线性最优化算法来优化所有摄像机内外参数。

步骤 3: 从基准图像中提取脸和眼睛、眉毛、鼻子、嘴的轮廓线, 使用动态

规划算法对轮廓线上的所有像素点进行匹配,并根据已匹配的轮廓线将基准图像中的人脸划分为7个区域:

步骤 3.1: 从基准图像中提取脸和眼睛、眉毛、鼻子、嘴的轮廓线。要求轮廓线的宽度为一个像素,每一条轮廓线都是连续并且封闭的。

现在已有多种从图像中提取脸和眼睛、眉毛、鼻子、嘴的轮廓线的方法,例如可以使用人工手动的方法,直接在图像中画出轮廓线。

步骤 3.2: 分别将步骤 3.1 提取出的基准图像中的每一条轮廓线作为动态规划算法的路径,使用动态规划算法,找到这些轮廓线上的每一个像素点在对准图像中对应的匹配点,

把为基准图像中的像素点在对准图像中找到对应匹配点的过程称为匹配过程,把已经在对准像图像中找到对应匹配点的基准图像中的像素点称为已匹配点,把还没有在对准图像中找到对应匹配点的基准图像中的像素点称为待匹配点,把基准图像中完全由未匹配点组成的区域称为待匹配区域,

步骤 3.3: 如图 10 所示,粗线为轮廓线,称眼睛轮廓线包围区域 R_1 和 R_2 为眼睛区域,眉毛轮廓线包围区域 R_3 和 R_4 为眉毛区域,鼻子轮廓线包围区域 R_5 为鼻子区域,嘴轮廓线包围区域 R_6 为嘴区域,脸部轮廓线所包围的除去眼睛、眉毛、鼻子、嘴区域以外的区域 R_7 即图 10 中阴影区域为脸部区域。脸部轮廓线以外的区域不参加运算。

这些区域均为待匹配区域,其中所有的点都是待匹配点。各个区域相互之间被由已匹配点组成的轮廓线分隔开。

步骤 4: 在基准图像中,对眼睛待匹配区域、眉毛待匹配区域、鼻子待匹配区域、嘴待匹配区域,从每个待匹配区域的外边缘线开始,向区域内部,使用区域增长与动态规划相结合的算法,对区域内的待匹配像素点进行匹配:

步骤 4.1: 在基准图像中选取鼻子待匹配区域的连续的单像素宽度的外边缘线 l 。这里外边缘线指的是待匹配区域中的、与区域外部相邻的像素点所组成的一条曲线,也就是待匹配区域中最靠外面的一圈像素点。

图 11(a)为基准图像中的已经划分好区域的人脸;图 11(b)为图 11(a)的局部放大图,图中 R_5 是鼻子待匹配区域, R_7 是脸部待匹配区域,粗黑线为步骤 3.2 提取的鼻子轮廓线,细线 l 为 R_5 的外边缘线;图 11(c)为图 11(b)的局部放大图,图中灰色方块为轮廓线,白色方块为边缘线 l ,边缘线与轮廓线是紧邻的。

步骤 4.2: 对外边缘线 l 上的每一个像素点 p_k , $k=1,2,3,\dots,K$, K 为 l 上

的像素点数,选取所有与 p_k 相邻的已匹配点 S_{Lm} , $m = 1, 2, 3, \dots, M$, M 为与 p_k 相邻的已匹配点数,令 S_{Lm} 与 S_{Rm} 在对准图中的匹配点 S_{Rm} 组成种子点对,根据区域增长算法原理,确定 p_k 在对准图中的匹配点的搜索范围,

如图 12 所示,图 12(a)为基准图像的局部放大图,图中白色方块为边缘线 l ,灰色方块为轮廓线,同时也是已匹配点, P_{L1} 是 l 上的任意一点, S_{L1} 、 S_{L2} 是与 P_{L1} 相邻的已匹配点;图 12(b)为对准图像的局部放大图,图中灰色方块为基准图像中轮廓线像素点对准图像中对应的匹配点,其中 S_{R1} 、 S_{R2} 是 S_{L1} 、 S_{L2} 在对准图像的匹配点,区域 W_1 、 W_2 分别为由 S_{R1} 、 S_{R2} 根据区域增长策略得到的 P_{L1} 匹配点的搜索范围, W_1 和 W_2 的重叠区域即图中的粗线方框即为由 S_{R1} 、 S_{R2} 共同得到的 P_{L1} 匹配点对准图像中的最终搜索范围。

步骤 4.3: 以 l 为动态规划算法的路径,使用动态规划算法,对 l 上的每一点 p_k , 在对准图中已确定的搜索范围内寻找对应的匹配点,完成 l 的匹配。

步骤 4.4: 重复执行步骤 4.1、4.2、4.3, 为基准图像中鼻子待匹配区域内的所有像素点对准图像中找到对应的匹配点。如图 13 所示,图中粗黑线为鼻子轮廓线,细黑线为第一条外边缘线,虚线为第一次匹配完成后选取的第二条新的外边缘线,也是动态规划的路径。箭头所示为区域增长的方向,由初始外边缘线向区域内部一圈一圈地收缩,与动态规划路径接近垂直。

步骤 4.5: 对眼睛待匹配区域、眉毛待匹配区域、嘴待匹配区域执行步骤 4.1、4.2、4.3、4.4, 为基准图像中眼睛待匹配区域、眉毛待匹配区域、嘴待匹配区域内的所有像素点对准图像中找到对应的匹配点。

步骤 5: 在基准图像中,从脸部待匹配区域的外边缘线开始,向区域内部,使用区域增长与动态规划相结合的算法,对基准图像中脸部待匹配区域内的像素点进行匹配。

随着匹配过程的进行,脸部待匹配区域不断向区域内部收缩,区域的外边缘会与眼睛、眉毛、鼻子、嘴的轮廓线相遇,由此将匹配过程分为两个阶段:从匹配过程开始到脸部待匹配区域外边缘与眼睛、眉毛、鼻子、嘴的轮廓线中任意一条相遇为第一阶段,从脸部待匹配区域外边缘与眼睛、眉毛、鼻子、嘴的轮廓线中任意一条相遇之后到整个匹配过程完成为第二阶段。

图 14(a)为第一阶段示意图,图中粗线为轮廓线,灰色区域为已匹配区域,白色区域为待匹配区域。此时脸部区域向内部收缩匹配,但外边缘还没有与任何轮廓线相遇。

图 14(b) 为第二阶段示意图, 图中粗线为轮廓线, 灰色区域为已匹配区域, 白色区域为待匹配区域。此时脸部待匹配区域的外边缘已经与轮廓线相遇, 轮廓线成为脸部待匹配区域边界的一部分, 形成了新的边界。

具体匹配过程如下, 各步骤按阶段不同而略有不同:

步骤 5.1: 在第一阶段中, 在基准图像中直接选取脸部待匹配区域的连续的单像素宽度的外边缘线 l , 在第二阶段中, 脸部待匹配区域外边缘与眼睛、眉毛、鼻子、嘴的轮廓线相遇后, 以遇到的轮廓线为脸部待匹配区域的边界的一部分, 与原有边界一起形成了新的脸部待匹配区域边界, 沿着新的边界选取脸部待匹配区域的连续的单像素宽度的外边缘线 l 。

如图 13 所示, 图 14(a) 为第一阶段, 虚线为脸部待匹配区域 R_1 的外边缘线。箭头所示为区域增长方向。图 14(b) 为第二阶段, 虚线为沿新的边界取的外边缘线。箭头所示为新的区域增长方向。

步骤 5.2: 与步骤 4.2 相同。

步骤 5.3: 与步骤 4.3 相同。

步骤 5.4: 重复执行步骤 5.1、5.2、5.3, 为基准图像中脸部待匹配区域内的所有像素点在对准图像中找到对应的匹配点,

步骤 6: 将每个基准图像中的像素点和该像素点在对准图像中对应的匹配点合称为一个匹配点对, 根据步骤 1 得到的两台摄像机的内参数矩阵 A_L 、 A_R 和外参数矩阵 $[R_L T_L]$ 、 $[R_R T_R]$, 计算步骤 4 和步骤 5 得到的匹配点对所对应的人脸上的实际点的三维坐标, 进而得到整个人脸的三维点云数据。

如图 15 所示, O_L 、 O_R 分别为两台摄像机的光心, S_L 、 S_R 分别为两台摄像机的成像平面, A_L 、 A_R 分别为两台摄像机的内参数矩阵, $[R_L T_L]$ 、 $[R_R T_R]$ 分别为两台摄像机的外参数矩阵, P_L 、 P_R 为两台摄像机所拍图像中的一对匹配点。根据 A_L 、 $[R_L T_L]$ 、 O_L 、 P_L 计算出一条由 O_L 发出, 并且经过 P_L 的射线 l_L , 根据系统模型可知, P_L 、 P_R 对应的人脸上的实际点 P 也在这条射线上。同理, 根据 A_R 、 $[R_R T_R]$ 、 O_R 、 P_R 计算出一条由 O_R 发出, 并且经过 P_R 的射线 l_R , P 点同样在这条射线上。考虑到计算误差, 取射线 l_L 和 l_R 的公垂线的中点为 P 点, 由此得到匹配点对 P_L 和 P_R 所对应的人脸上的实际点 P 的三维坐标。对每一个匹配点对重复同样运算, 即可得到整个人脸的三维点云数据。

本发明的完整流程图如图 1 所示。

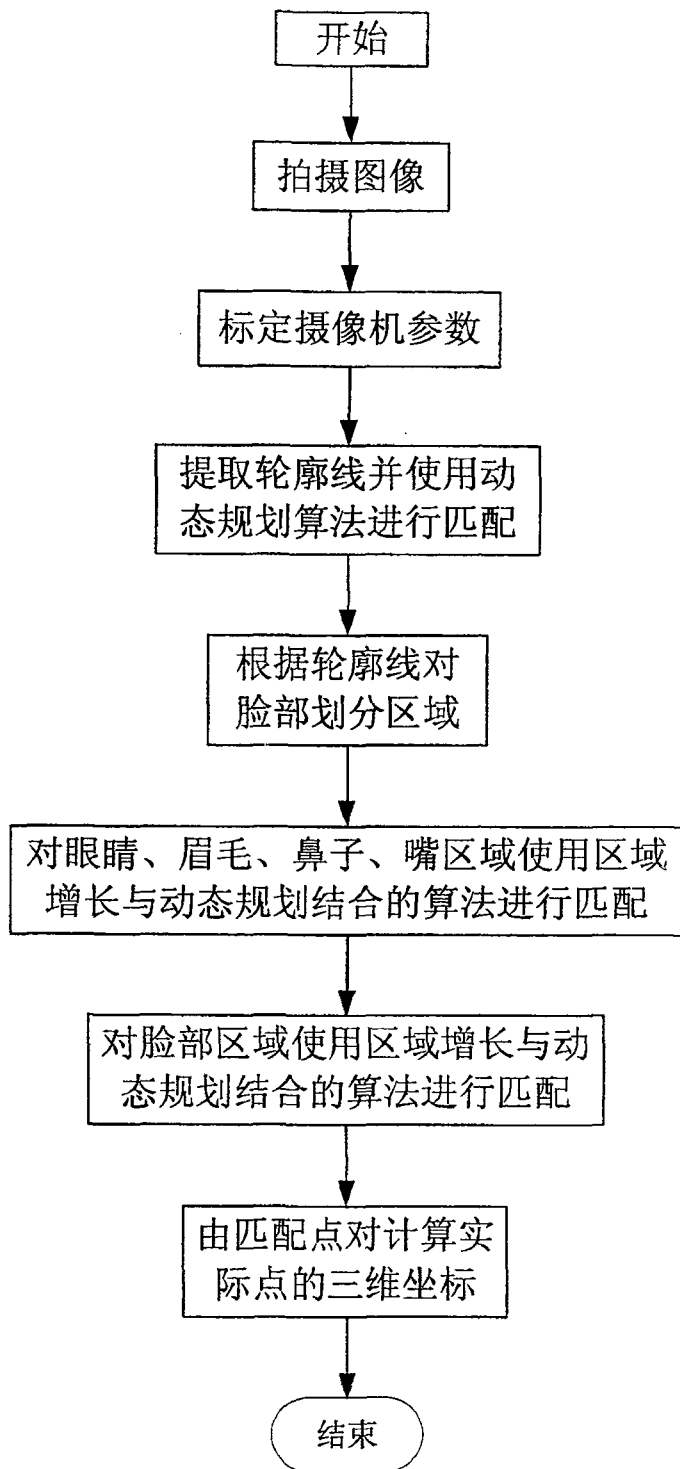


图 1

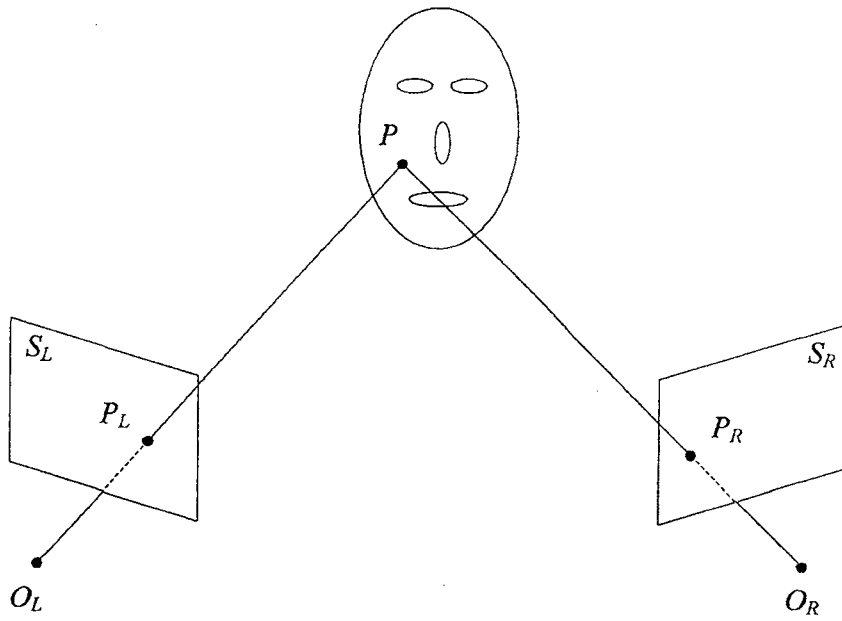


图 2

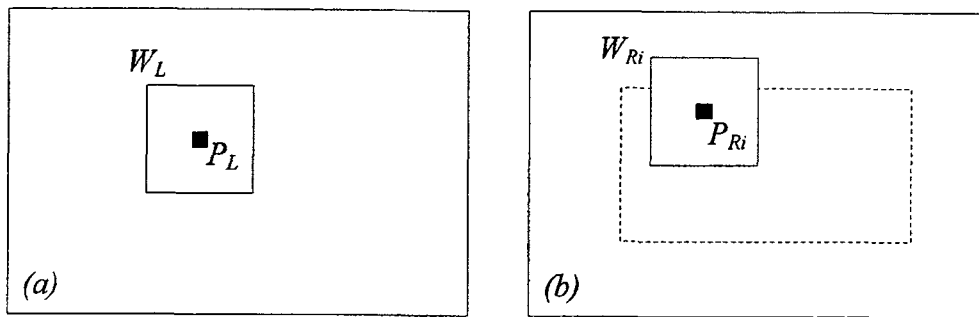


图 3

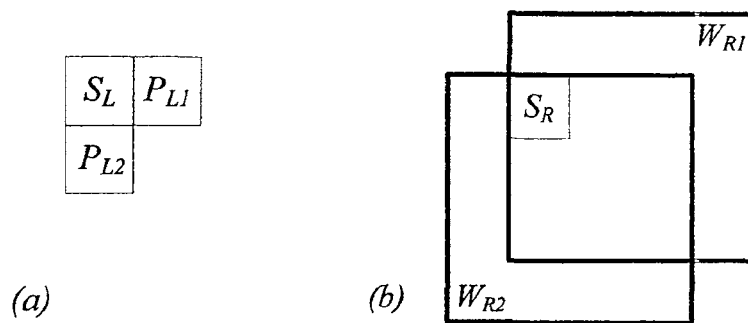


图 4

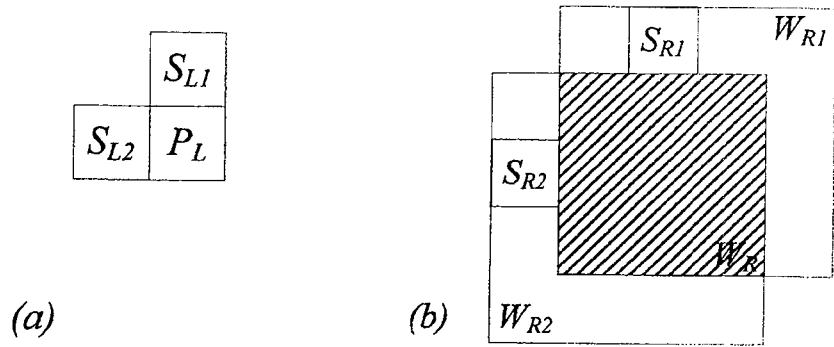


图 5

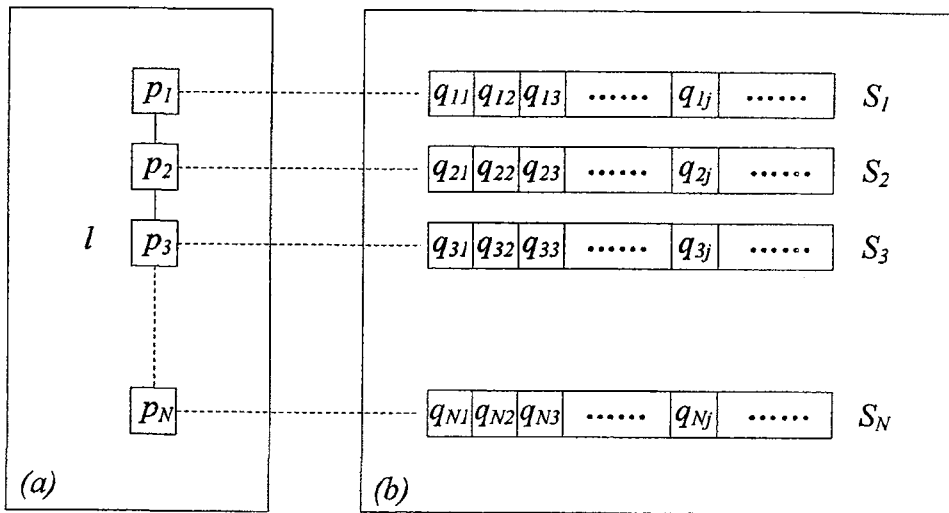
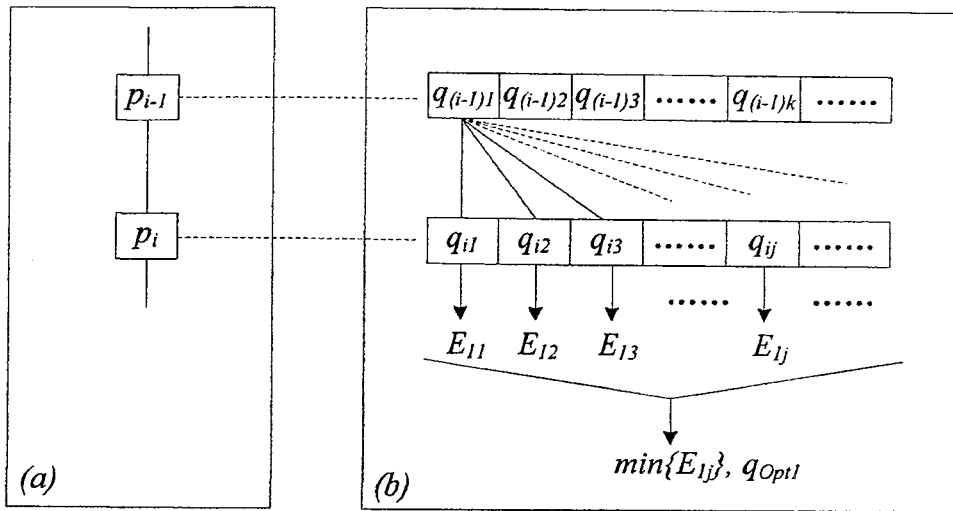
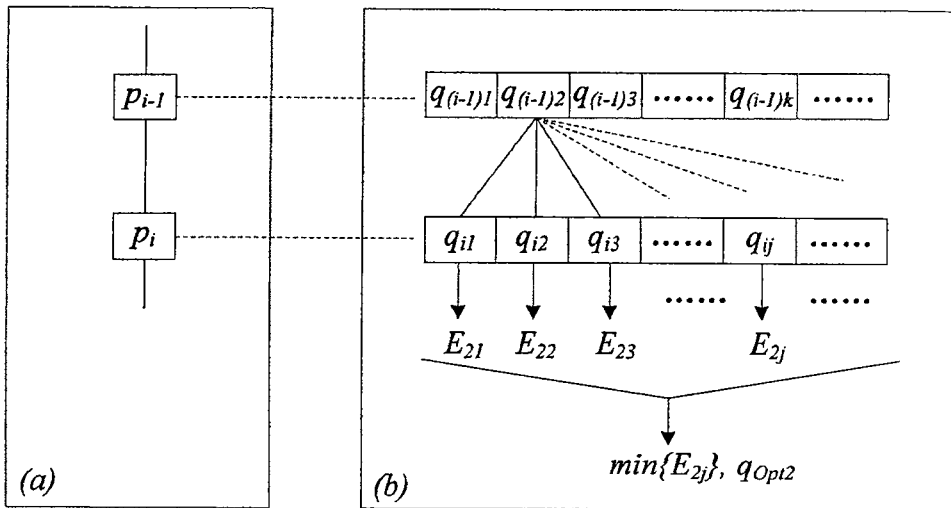


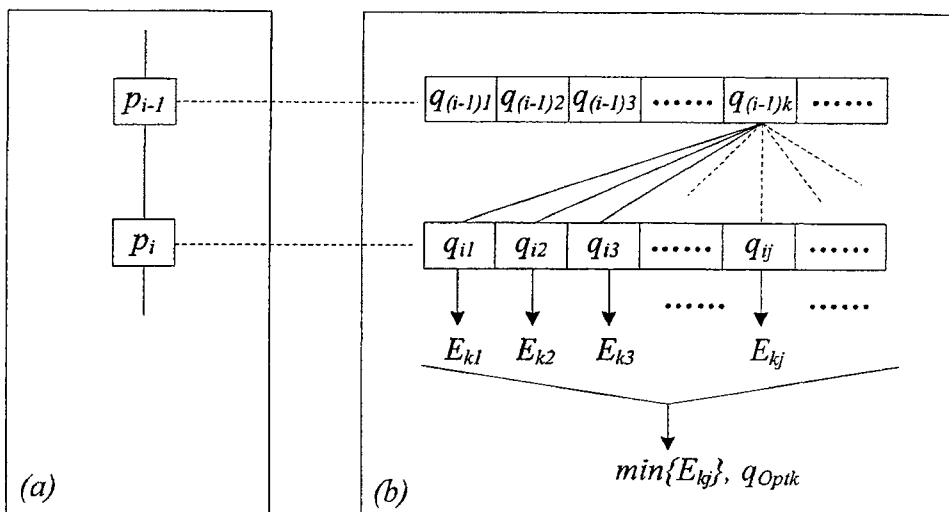
图 6



(1)



(2)



(3)

图 7

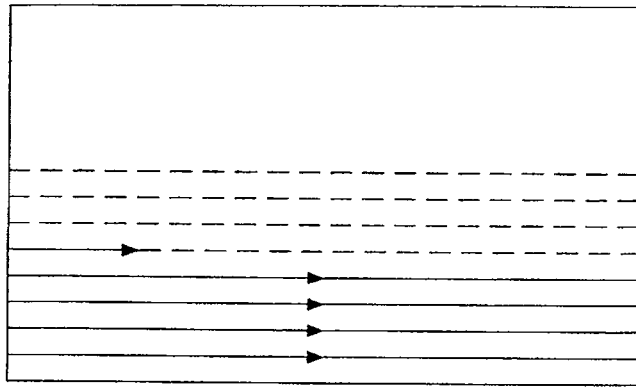


图 8

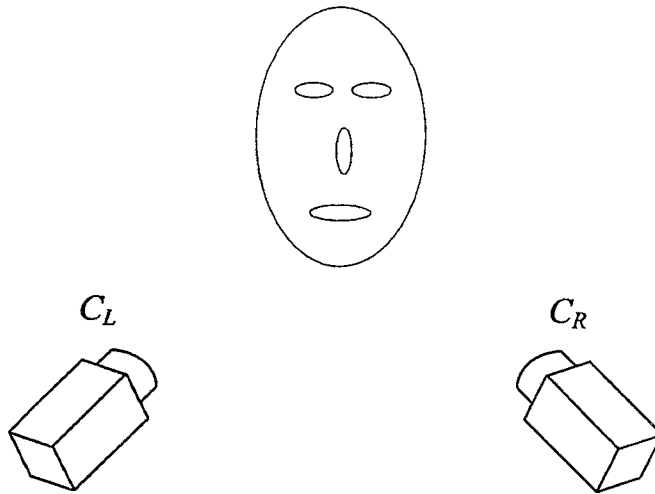


图 9

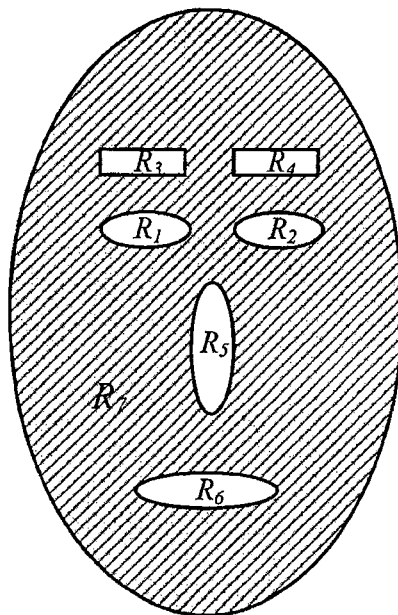


图 10

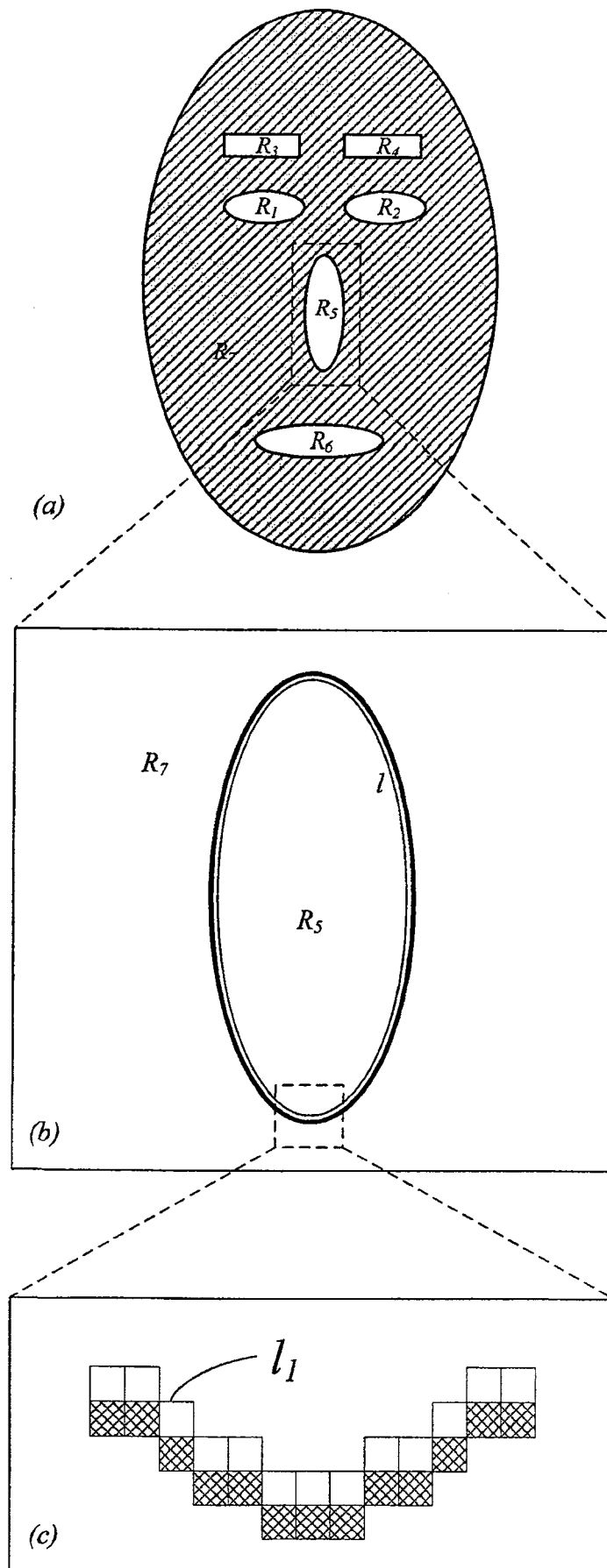


图 11

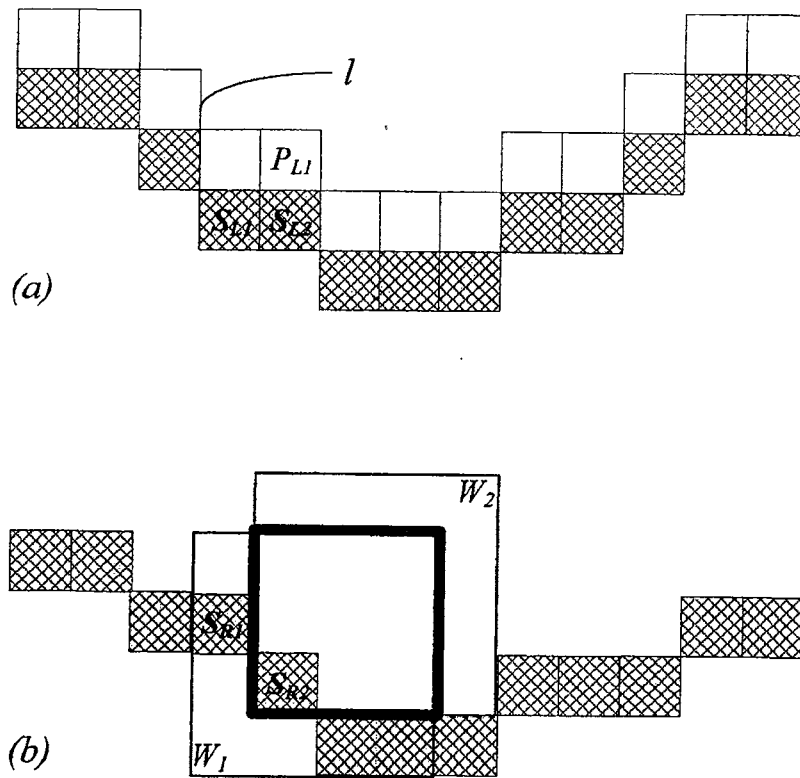


图 12

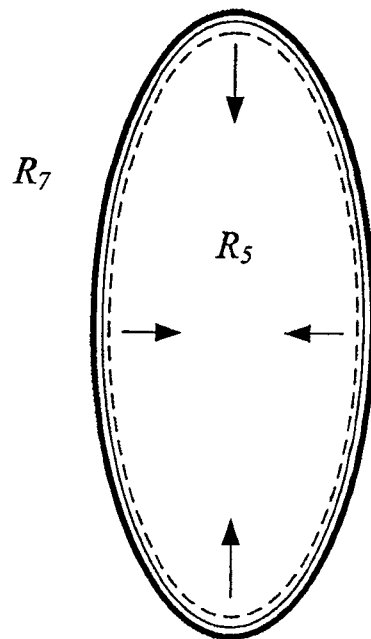


图 13

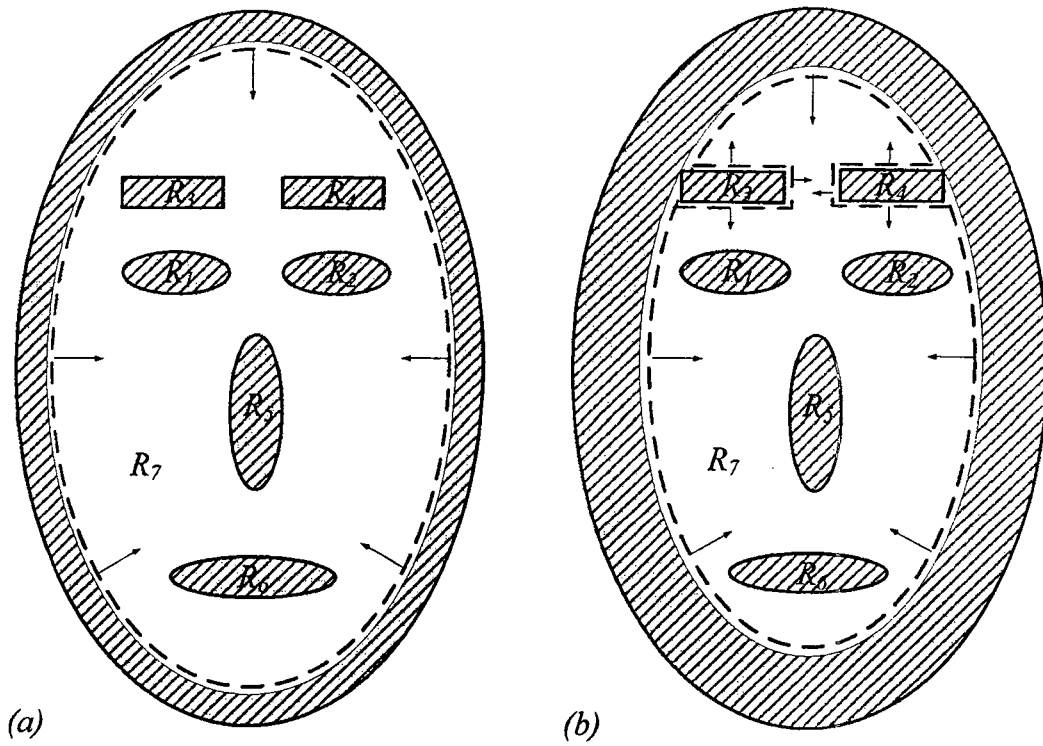


图 14

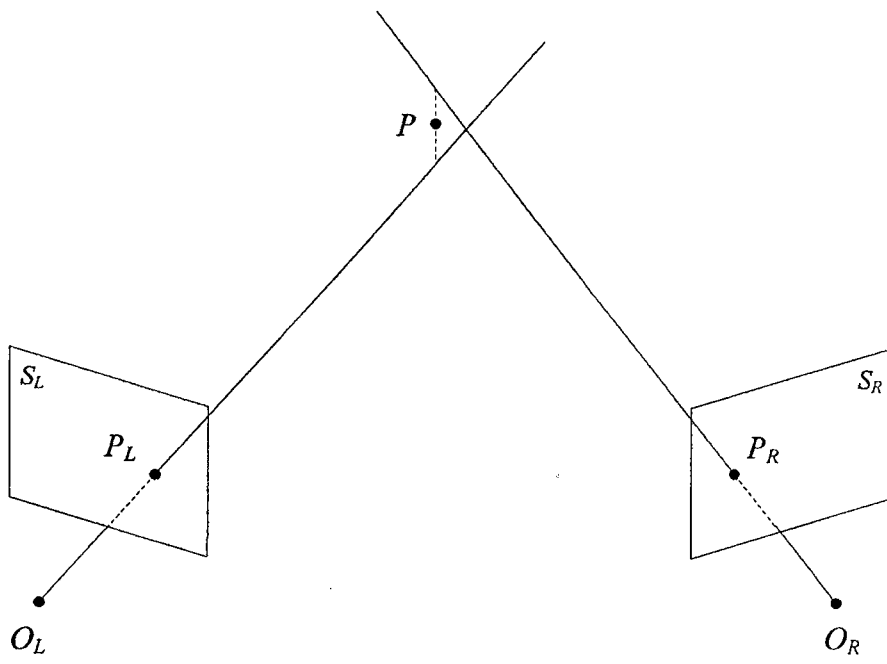


图 15