

基于模糊判别的立体匹配算法

周东翔 蔡宣平 孙茂印

(国防科技大学电子科学与工程学院, 长沙 410073)

摘要 立体视觉一直是计算机视觉领域所研究的一个中心问题, 而立体匹配则是立体视觉技术中最关键也是最困难的部分。就得到适用于基于图象绘制技术中视图合成的准确、高密度视差图(Disparity Map)而言, 现有的一些方法存在一定的局限性。考虑到立体匹配过程中存在的不确定性和模糊性, 本文将已获得广泛应用的模糊理论引入立体匹配领域, 提出了基于模糊判别的立体匹配算法, 并用实际图象与合成图象进行了实验验证, 结果表明该算法效果良好, 具有实用价值。

关键词 计算机视觉 模糊判别 立体匹配 视差图

中图法分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-896X(2001)04-0359-06

A Stereo Matching Algorithm Based on Fuzzy Identification

ZHOU Dong-xiang, CAI Xuan-ping, SUN Mao-yin

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract Stereo vision has long been one of the central research problems in computer vision, and stereo matching is the most important and difficulty issue of stereo vision. There are some limits for existing approaches to recover precise and dense disparity map. Feature-based stereo can produce more precise matching but only sparse disparity map. On the other hand, Area-based approaches can provide dense disparity map but less precise matching. In the situation of image synthesis for IBR, we need not only precise matching but also a dense disparity map. Thinking of the uncertain and fuzzy characteristic during matching, we introduce the widely used fuzzy set theory to the field of stereo matching, and propose an algorithm based on fuzzy identification. The algorithm uses the information of gradient magnitudes, angles of orientation and gray value information of nearby points as the identification facts. Experiments with real and synthetic images have been performed, they show that this algorithm is effective and it is of great value to use.

Key words Computer vision, Fuzzy identification, Stereo matching, Disparity map

0 引言

如今基于图象的绘制方法(IBR)已成为计算机图形学与虚拟现实技术的热门研究课题, 而采用计算机视觉领域立体视觉技术来恢复景物深度信息的方法为 IBR 提供了更便利的途径。1982年, Barnard和 Fischler^[1]将立体视觉分为6个步骤: 图象获取, 相机建模, 特征提取, 图象匹配, 深度恢复, 深度插值。在这6个步骤中, 图象匹配被普遍认为是最困难也是最关键的问题, 即通过找出每对图象间的对应关系, 来解决立体匹配问题, 进而得到视差图。在获得了视差图后, 也就完全可以根据相机的位置关系、

焦距而很容易地得到图象的深度信息, 其视差 d 与景物的深度 z 关系为

$$d = BF \frac{1}{z} \quad (1)$$

式中, B 为图象对的基线距离, F 为相机的焦距。

目前, 关于立体匹配人们已提出了很多算法, 主要可分为3类: 基于特征^[2~5]、基于区域^[6~9]及基于相位^[10, 11]。基于特征方法可以得到较高的精确度但只能得到稀疏的视差图; 基于区域方法可以得到密集的视差图但可靠性要差。在 IBR 的图象合成应用中我们希望得到既精确又高密度的视差图, 为满足这种需求, 在文献[12]中提出了基于特征约束的立体匹配算法, 首先获得边缘特征点的视差, 然后在这

些特征点视差图的约束下,对非特征点利用区域相关算法进行匹配,既缩小了匹配空间,又保证了匹配的相对准确性,获得了较好的效果,但带来的问题是,由于特征点的视差图对整个视差图的准确性起着至关重要的作用,且在噪声、遮挡及透视等因素影响比较严重的情况下,特征点的精确匹配会受到干扰,因此本文提出基于模糊判别的立体匹配算法,其可以充分保证特征点匹配的准确性。

1 多因素模糊判别原理

自从1965年Zadeh提出模糊集理论以来,它在各个学科领域得到了广泛的研究和应用,最近几年,模糊理论在图象处理和模式识别中的应用热潮正在兴起,这是因为(1)模糊理论在图象理解及模式识别等一些类似人脑识别系统的应用中具有自然的有效性(2)模糊集理论为处理日常生活中的噪声及不确定信息提供了一个很好的平台^[13]。

模糊判别的基本原则是最大隶属度原则。在日常生活中,一个标准模式往往具有多个模糊特征,如已知 p 个具有 q 个模糊特征的标准模式,若其中第 n 个模式的第 m 个模糊特征为: $X_{nm}, m=1, 2, \dots, p; m=1, 2, \dots, q$ 则每个标准模式 A_i 成为一个模糊向量

$$A = A_i(A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{iq}) \quad 1 \leq i \leq p \quad (2)$$

设 $U(u_1, u_2, \dots, u_q)$ 是待判别对象,它的每一个分量 u_j 对应着一个模糊特征,若存在 $i \in \{1, 2, \dots, p\}$,并使得

$$\mu_{A_i}(u) = \max(\mu_{A_1}(u), \mu_{A_2}(u), \dots, \mu_{A_p}(u)) \quad (3)$$

则认为 u 相对隶属于 A_i 。其中假定

$$\mu_{A_i}(u) = M_m(\mu_{A_{i1}}(u_1), \mu_{A_{i2}}(u_2), \dots, \mu_{A_{iq}}(u_q)) \quad (4)$$

$\mu_{A_i}(u)$ 为隶属函数, $M_m(\cdot)$ 是一个综合函数,通常选用如下加权求和函数

$$\sum X = \sum_{j=1}^q \alpha_j x_j \quad (5)$$

加权求和函数不仅能通过对权重 α_j 的调整来强调局部特征,也不会忽略其他特征,因此适合于多因素的模糊综合判别。

2 算法描述

立体匹配的本质就是,通过给定一幅图象中的一点,来寻找另一幅图象中的对应点,以使得这两点为空间同一物体点的投影。为了不失一般性,本文仅

考虑平行轴情况下的立体匹配,即两个摄像机仅在水平方向上有一平移,因为在实际应用中我们一般均采用这种方式来获取图象对,以便使得两幅图象的匹配点位于同一条扫描线上,这就是立体匹配中的外极线约束,同时,本算法还将利用匹配保序性约束,即匹配点在两幅图象中的先后顺序应一致。

基于模糊判别的立体匹配算法由两部分构成,一是边缘特征点的模糊匹配过程,二是非特征点的灰度段匹配过程。

2.1 边缘特征点的模糊匹配过程

边缘特征点的匹配就是要找到一幅图象中某一扫描线上的某个边缘特征点在另一幅图象中的对应边缘特征点,但由于在外极线的约束下,在另一幅图象中相应扫描线上,仍然存在多个可能匹配的边缘点,因而匹配过程具有不确定性和模糊性。本文应用模糊理论来解决边缘点的匹配问题的出发点正在于它能有效地处理这种不确定性问题的模糊性。

我们采用经典的Sobel算子提取图象对的边缘特征,以边缘点的梯度大小、方向、边缘点的梯度大小相关系数以及边缘点的灰度相关系数等4个因素作为边缘点相似性的度量要素。

2.1.1 梯度大小相似性

设第1幅图象中待匹配边缘点的梯度大小为 g ,第2幅图象中候选匹配点的梯度大小与 g 的差距可设为正态分布关系,即

$$d(x) = e^{-k(x-g)^2} \quad (6)$$

其中, $k > 0$,在本文的实验中,进行如下选取

$$\begin{cases} k = \frac{1}{2 \times \sigma^2} \\ \sigma = \frac{g \times P_g}{3} \end{cases} \quad (7)$$

也即呈正态分布的 3σ 点为 $g \times P_g$ (本文在实验中选取 P_g 为50%)其中 P_g 表示梯度大小 g 的百分比。

这样,即可利用下式来计算梯度大小的相似性

$$\mu_{sob} = \cos^n(k_s(1 - d(x))) \quad (8)$$

本文在实验中选取 $n_s = 3, k_s = \pi/2$ 。

2.1.2 方向相似性

设第1幅图象中待匹配边缘点的方向为 φ ,第2幅图象中候选匹配点的方向与 φ 的差距 $\theta(x)$ 可设为正态分布,即

$$\alpha(x) = e^{-k(x-\varphi)^2} \quad (9)$$

式中, k 的选取与式(6)类似,只不过本文实验中选

取 3σ 点为 20° 。

然后利用下式计算方向的相似性

$$\mu_{-ang} = \cos^n(k_a(1 - \theta(x))) \quad (10)$$

本文在实验中选取 $n_a = 3, k_a = \pi/2$ 。

$$\alpha(x, y, d) = \frac{\sum_{i,j} (S_L(x+i, y+j) - \bar{S}_L(x, y)) \times \sum_{i,j} (S_R(x+d+i, y+j) - \bar{S}_R(x+d, y))}{\sqrt{\sum_{i,j} (S_L(x+i, y+j) - \bar{S}_L(x, y))^2} \times \sqrt{\sum_{i,j} (S_R(x+d+i, y+j) - \bar{S}_R(x+d, y))^2}} \quad (11)$$

式中, $-n \leq i \leq n, -m \leq j \leq m, S_L, S_R$ 分别表示左右图象对中待匹配边缘点及候选匹配点 $(2n+1) \times (2m+1)$ 相关窗口内像素点的 Sobel 算子梯度值, d 表示这两个边缘点在水平方向上的距离, 也即视差。

得到了上述相关系数后, 为了调和该因素在模糊匹配中的份量, 即可利用下式计算相似性

$$\mu_{-sobcor} = \cos^n(k_{sc}(1 - \alpha(x, y, d))) \quad (12)$$

本文在实验中选取 $n_{sc} = 3, k_{sc} = \pi/2$ 。

2.1.4 灰度相关系数及其相似性计算

灰度相关系数的计算采用式(11)的形式, 只不过式中的梯度大小变为像素点的灰度值。

相似量 $\mu_{-graycor}$ 的计算同样采用式(12)的形式。

2.1.5 总的相似性计算

前面已分别讨论了 4 个因素的相似性计算问题, 这样总的相似性可利用下式计算

$$\mu_{-total} = \alpha_1 \mu_{-sob} + \alpha_2 \mu_{-ang} + \alpha_3 \mu_{-sobcor} + \alpha_4 \mu_{-graycor} \quad (13)$$

式中, $\alpha_i (i = 1, \dots, 4)$ 为各个因素的权重, 在我们的实验中, $\alpha_1 = 0.2, \alpha_2 = 0.2, \alpha_3 = 0.3, \alpha_4 = 0.3$ 。

这样, 对各个候选边缘点即可利用上式进行相似性计算, 并选择 μ_{-total} 值最大的边缘点作为匹配点, 然后横向坐标相减便得到视差。

2.2 非边缘特征点的匹配过程

利用上述基于模糊匹配算法可以得到左图象中边缘点的准确视差图, 根据外极线约束及保序性约束, 即将左图象中非边缘点在右图象中的匹配点完全约束在相应扫描线的一定区间内, 匹配既可以利用参考文献 [12] 中的区域相关算法进行, 也可以采用下面的灰度段匹配算法。

实际上, 在已获得左图象边缘特征点的视差图后, 就完全可以得到每一行中剩下的图象段在右图象中的匹配段, 根据它们的灰度信息特征, 将其称之为灰度段, 于是剩下的问题仅是如何获得两个匹配

2.1.3 梯度大小相关系数及其相似性计算

为了更好地实现边缘点的匹配, 本文将边缘点邻域内像素点的梯度大小也作为考虑的因素, 利用下式来计算待匹配边缘点与匹配点的梯度大小相关系数为

灰度段像素点的对应关系。

本文采用动态规划方法来获得一种最优解。

设 A, B 分别为左、右图象对应极线上相匹配的灰度段

$$\begin{cases} A = a_1, a_2, \dots, a_M \\ B = b_1, b_2, \dots, b_N \end{cases} \quad (14)$$

如图 1 所示, A, B 构成平面。平面上的阵点 $c = (i, j)$ 的序列则表示 A, B 两灰度段对应像素点的匹配路径。

$$F = c_1, c_2, \dots, c_k, \dots, c_L, \quad c_k = (i_k, j_k) \quad (15)$$

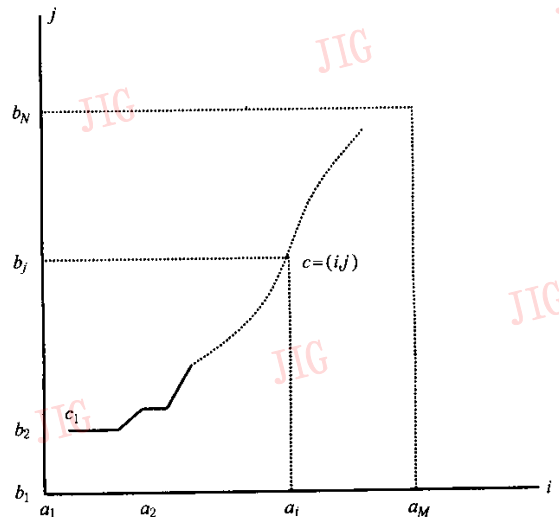


图 1 灰度段 A, B 及像素匹配路径的对应关系

若 $d(c) = d(i, j) = \|I(a_i) - I(b_j)\|$ (式中 $I(a_i), I(b_j)$ 分别表示像素点 a_i, b_j 的灰度值) 表示像素点 a_i 和 b_j 的距离, 沿 F 路径的距离总和表示为

$$D(F) = \sum_{k=1}^L d(c_k) w_k / \sum_{k=1}^L w_k \quad (16)$$

式中, w_k 表示与 F 相关的正加权系数, $D(F)$ 值越小, 则 A 与 B 的对应越好。

设 $w_k = (i_k - i_{k-1}) + (j_k - j_{k-1})$ ($i_0 = j_0 = 0$), 则 w_k 就是沿纵、横线轴的基本轨迹线, 称为市区化距离 (city block distance) [14], 则

$$\sum_{k=1}^{k=L} w_k = M + N \quad (17)$$

这时,式(16)就可以改写成下式

$$D(F) = \frac{1}{M + N} \sum_{k=1}^L d(c_k) w_k \quad (18)$$

设部分点阵 $c_1, c_2, \dots, c_k (c_k = (i, j))$ 的和为 $g(c_k) = g(i, j)$ 则动态规划的定型公式为

$$g(i, j) = \min \begin{bmatrix} g(i, j-1) + d(i, j) \\ g(i-1, j-1) + 2d(i, j) \\ g(i-1, j) + d(i, j) \end{bmatrix} \quad (19)$$

首先,设 $g(1, 1) = 2d(1, 1), j = 1$, 并且一边变化 i , 一边计算式(19) 然后增加 j , 反复进行相同的计算, 使 $j = N$. 由于存在遮挡的情况, 图象对中相匹配灰度段的端点与端点不一定完全对应, 因此必须将灰度段始点终点皆放松. 在最后求取距离总和时, 本文采用如图2所示的策略, 从 $g(M, N)$ 出发, 寻找 $g(m_k, N), m_k = M, M-1, \dots, 1$ 中的第1个极小值 $g(m, N)$ 及 $g(M, n_k), n_k = N, N-1, \dots$ 中的第1个极小值点 $g(M, n)$ 这样规一化后的距离为

$$D(F) = \min(g(m, N), g(M, n)) / (M + N) \quad (20)$$

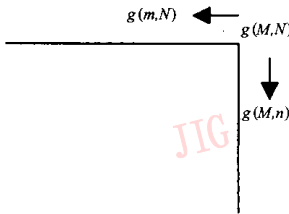


图2 搜索最小距离和示意图

如果已分别找到了第1个极小值 $g(m, N)$ 及 $g(M, n)$, 设 $g(m, N) < g(M, n)$ 则 (m, N) 为末端匹配点对, 也就是说左图象A段的第 m 个象素点与右图象B段的第 N 个象素点(端点)匹配. 从末端匹配点对出发, 逐步往前搜索其余的匹配点对, 直至始端点(如图3所示).

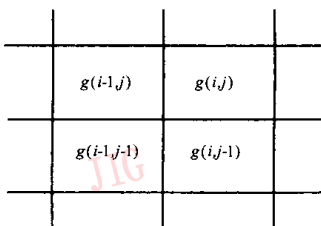


图3 匹配点对的选取示意图

按照以下处理原则:

if $\left[\begin{matrix} (g(i-1, j-1) < g(i-1, j) \text{ and}) \\ (g(i-1, j-1) < g(i, j-1)) \end{matrix} \right]$ or $\left[\begin{matrix} (g(i-1, j-1) = g(i-1, j) \text{ and}) \\ (g(i-1, j-1) = g(i, j-1)) \end{matrix} \right]$ 选取 $(i-1, j-1)$

if $\left[\begin{matrix} (g(i-1, j) \leq g(i-1, j-1) \text{ and}) \\ (g(i-1, j) < g(i, j-1)) \end{matrix} \right]$ 选取 $(i-1, j)$

else 选取 $(i, j-1)$

即可得到最佳匹配路径(图4), 象素点的视差也可以计算出来.

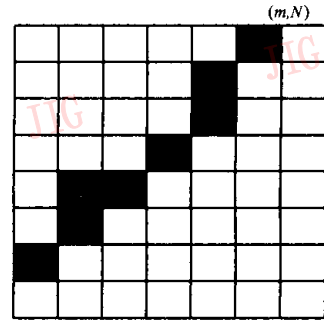


图4 最佳匹配路径示意图

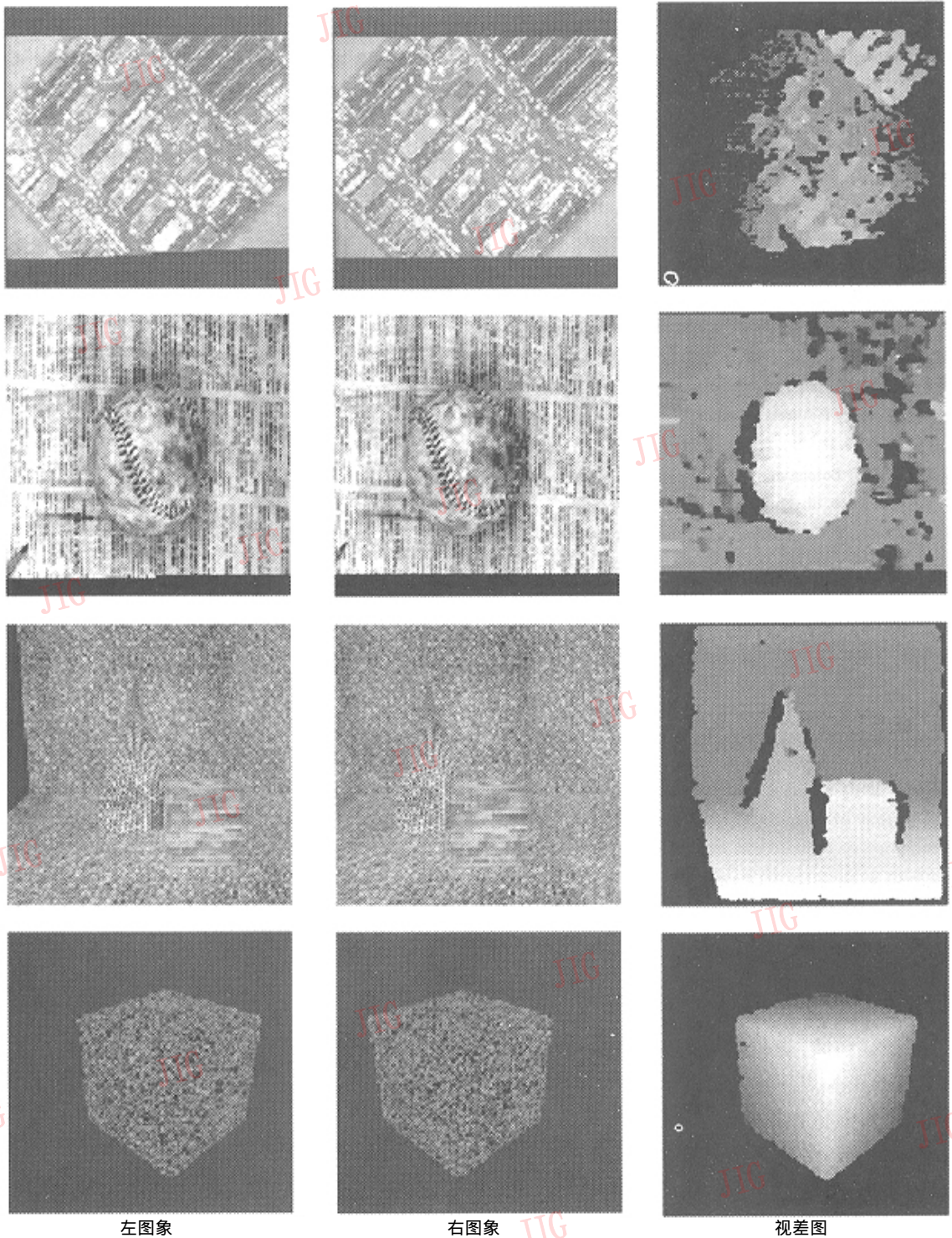
3 实验结果

本文采用美国 Carnegie Mellon 大学机器人学院视觉与自动系统中心的原图象在 PC 机上对本文提出的算法进行了实验验证, 如图5(见下页)所示.

这些图象中上面两行图象为线路板和棒球的真实图象, 下面两行图象为合成图象, 并列出了左右原图象及最后的视差图, 视差图中灰度级低(亮度低)的地方表示视差小, 按照式(1)也即距视点较远, 深度值大; 反之, 灰度级高(亮度高)的地方表示视差大, 距视点较近, 深度值小; 从图中还可以看出, 不管是真实图象, 还是仿真图象都获得了很好的效果, 从而说明本文提出的算法是有效的.

4 结论

本文在分析现有立体匹配算法的基础上, 提出了基于模糊判别的立体匹配算法, 先利用多因素模糊判别原理获得边缘特征点的准确视差图, 然后在此视差图的约束下, 基于动态规划算法获得非特征区域灰度段的象素对应关系, 从而得到既准确又高密度的视差图. 通过实验验证, 本算法效果良好, 在



左图象

右图象

视差图

图 5 原图象及其视差图

虚拟现实、机器人视觉领域具有实用价值。

参考文献

- 1 Barnard S, Fischler M. Computational stereo. ACM Comput. Surveys, 1982, 14(4):553-572.
- 2 Marr D, Poggio T. A theory of human stereo vision. Tech. Rep. AI Memo 451, Artificial Intell. Lab., Mass. Inst. Technol., Cambridge, Nov. 1977.
- 3 Grimson W, Eric L. Computational experiments with a feature based stereo algorithm. IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1985, 7(1):1734.
- 4 Baker H H, Binford T.O. Depth from edge and intensity based stereo. In Proc. Seventh Int. Joint Conf. Artif. Intell., Aug. 1981:631-636.

- 5 Hoff W, Ahuja N. Surfaces from Stereo: Integrating feature matching, Disparity Estimation, and Contour Detection. *IEEE on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 11(2):1211-16.
 - 6 Lan Zhong-Dan, Roger M. Robust matching by partial correlation. *INRIA N RR-2643*, 1995.
 - 7 Sun Changming. A fast stereo matching method. *Digital Image Computing and Applications, New Zealand*, December 10-12, 1997: 951-956.
 - 8 Hannah M J. A system for digital stereo image matching. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1989, 55(12):1765-1770.
 - 9 Fua P. Parallel stereo algorithm that produces dense depth maps and preserves image features. *Machine Vision and Applications*, 1993, 6(1):35-49.
 - 10 Frohlinghaus T, Buhmann J M. Regularizing phase-based stereo. <http://www.dbv.informatik.uni-bonn.de/jb/>
 - 11 Crespi B, Cozzi A G. Analog computation for phase-based disparity estimation: continuous and discrete models. *Machine Vision and Applications*, 1998, 11(2):339-345.
 - 12 Zhou Dongxiang, Cai Xuanping, Sun Maoyin. A feature-constrained stereo matching algorithm. In: *The Sixth International Conference of CAD/CG '99*, Shanghai, 1999.
 - 13 Chi Zheru, Yan Hong, Pham T. Fuzzy algorithms: With application to image processing and pattern recognition. *World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd*, Singapore, 1996.
 - 14 Pabiner L R, Schafer R W. *Digital processing of speech signals*, American, Prentice Hall, 1978.
 - 15 马颂德, 张正友. *计算机视觉*. 北京: 科学出版社, 1998.
 - 16 郑南宁. *计算机视觉与模式识别*. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- 周东祥 1968年生, 1992年获东南大学电子工程学院硕士学位, 现为国防科技大学科学与工程学院信息与通信系博士研究生. 主要研究方向为计算机视觉、虚拟现实、图形及图象处理与科学计算可视化技术.
- 蔡宣平 1962年生, 国防科技大学电子科学与工程学院信息与通信系主任、教授. 主要从事计算机图形学、信息处理等方面的教学与科研工作.
- 孙茂印 国防科技大学电子科学与工程学院教授、博士生导师. 主要从事计算机图形学、科学计算可视化、虚拟现实技术等方面的研究. 已发表论文60余篇, 曾获国家科技进步三等奖2项, 部委级科技进步一、二等奖5项.