

关于融合多针图确定物体三维 表面绝对深度的研究¹⁾

杨敬安

(合肥工业大学人工智能所 合肥 230009)

摘 要

利用 PS (Photometric Stereo) 系统很易确定物体表面方向及相对深度,但不能确定绝对深度. 为确定绝对深度,本文提出的算法首先利用 BPS (Binocular Photometric Stereo) 系统获得一对表面方向图,然后,基于 geodesic dome 分割这对方向图并计算图中对应区域间的视差. 最后,通过施加多种约束,经适当融合及精确的视差匹配,确定景物物体 3D 表面绝对深度. 这一方法对进一步研究怎样确定任意 3D 表面深度并复原景物结构有着十分重要的意义.

关键词: BPS 系统, 世界坐标系统, 立体图象的多针图, SFS 算法.

1 引言

三维视觉系统的主要任务之一要根据物体的 2D 图象确定其 3D 形状并实现对物体的识别与操作,因此,人们常把这种系统看作是智能机器人最重要子系统之一^{[1][2]}. 由于缺少视觉的机器人仅能按预先确定的工作程序在预先确定的空间重复的工作,而且轻微的干扰都会在其工作环境引起难以预测的故障,导致机器人停止工作,所以这样的机器人缺少柔性和可靠性.

智能机器人为识别物体,确定其最佳抓取位置,通常要求出景物内物体的表面方向并确定表面的 3D 深度,把光度体视和 SFS (Shape from shading) 方法相结合是实现这一任务的重要途径之一. 要获得景物物体的绝对深度,必须在两对应的表面方向图内进行对应区域间的视差匹配^{[3][4]}. 为提高匹配速度与精度,本文利用以下约束: (I) 表面方向约束; (II) 区域约束; (III) 双极线约束,以及 (IV) 父-子约束等以缩减搜寻空间. 约束 (I)、(II) 和 (III) 用于减小左、右区域间的搜寻空间,约束 (IV) 用于由粗到细的分割与匹配,缩减搜寻范围. 总之,匹配算法主要是利用约束比较左、右表面方向图的区域分割表,并遵循由粗到细的策略实现. 而且这些算法能确保充分利用明暗 (shading) 信息,实现精确匹配,确定 3D 表面的绝对深度.

1) 国家自然科学基金资助高技术项目.

本文于 1993 年 7 月 20 日收到

利用光度体视方法能够容易地由多幅 2D 图象确定表面方向及深度. 几年前, 这已由 MIT 的 AI 实验室成功实现. 但单摄像机的光度体视系统不能确定 3D 表面的绝对深度 (Absolute Depth). 为确定表面的绝对深度和物体的最佳抓取位置, 当时不得不借助于手-眼系统^[5]. 八十年代末, CMU 机器人研究所试图利用两个摄像机以确定景物物体的绝对深度, 但因计算比较复杂, 不确定因素比较多, 而且没有合适的表面方向图间视差计算方法, 因而所获得的结果并不十分理想, 确定的深度误差也比较大. 本文提出利用 BPS 系统的每个摄像机分别产生一表面方向图, 并对其分割产生与景物内物体对应的区域, 然后利用亮度相关 (lightness correlation) 或特征匹配计算视差^{[6][7]}, 使两幅表面方向图中相应区域的视差融合匹配, 并利用迭代法获得较精确的三维表面绝对深度.

2 区域间视差的转换

本节研究怎样利用摄像机模型转换两幅表面方向图内对应区域间的视差值为相应的深度值, 如图 1 所示. 为便于计算, 模型设置中的左摄像机图象平面垂直于 z 轴, 右摄像机图象平面与 z 轴倾斜某个角度, 以便使两光轴在 (x, y, z) 坐标系原点处相交. 此原点位于摄像机的正下方.

假设: (I) (u', v', w') 和 (u'', v'', w'') 分别表示左和右摄像机坐标系, (x, y, z) 是世界坐标系; (II) 物体远离摄像机或物体大小与其离开摄像机的距离相比可忽略不计.

根据上述假设, 利用图 1 所示的参数可获得以下坐标转换:

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -d' \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} u'' \\ v'' \\ w'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -d'' \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} u'' \\ v'' \\ w'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -d''\sin\theta \\ 0 \\ -d'' + d'\cos\theta \end{bmatrix}. \quad (3)$$

若定义参数 $a = \cos\theta$, $b = \sin\theta$, $c = -d''\sin\theta$, $d = -d'' + d'\cos\theta$,

那么可以导出

$$\begin{bmatrix} u'' \\ v'' \\ w'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & 0 & -b \\ 0 & 1 & 0 \\ b & 0 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -d'' \end{bmatrix}, \quad (4)$$

和

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & 0 & b \\ 0 & 1 & 0 \\ -b & 0 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u'' \\ v'' \\ w'' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} bd'' \\ 0 \\ ad'' \end{bmatrix}. \quad (5)$$

假设某表面在 (x, y, z) 坐标系可表示为 $Z = Z(x, y)$, 并且梯度图为

$$p = Z_x(x, y) \quad q = Z_y(x, y) \quad (6)$$

那么在 $(x, y, Z(x, y))$ 处的表面方向应是 $(-p, -q, 1)$. 由于左坐标系除沿 z 轴平移外等同于 (x, y, z) 坐标系, 因此很容易求出在左摄像机坐标系和 (x, y, z) 坐标系内表面方向的关系为

$$p^l = p, \quad (7)$$

$$q^l = q. \quad (8)$$

在右坐标系, 由于坐标系统的相对旋转, 同一点的方向与不同的 p 和 q 对应. 利用坐标转换 (p', q') 和 (p, q) 间的旋转可以求出. 令 $(-p', -q', 1)$ 是右坐标系内的向量并可利用式

$$\begin{bmatrix} -p^* \\ -q^* \\ z^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & 0 & b \\ 0 & 1 & 0 \\ -b & 0 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -p' \\ -q' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -ap' + b \\ -q' \\ bp' + a \end{bmatrix} \quad (9)$$

转换成 (x, y, z) 坐标系内的向量. 与标准的方向表达式 $(-p, -q, 1)$ 比较, 可以发现在 (x, y, z) 坐标系内右图象产生的针图可表示为

$$\bar{p}' = \frac{p^*}{z^*} = \frac{ap' - b}{a + bp'} \quad (10)$$

$$\bar{q}' = \frac{q^*}{z^*} = \frac{q'}{a + bq'} \quad (11)$$

利用类似等式, 左坐标系统的表面方向图也可在右坐标系内表示. 请注意表面点 $(x, y,$

$$Z(x, y)) \text{ 依据公式 } \begin{cases} u' = ax - bZ \\ v' = y \end{cases} \quad (12)$$

在右图象平面成象.

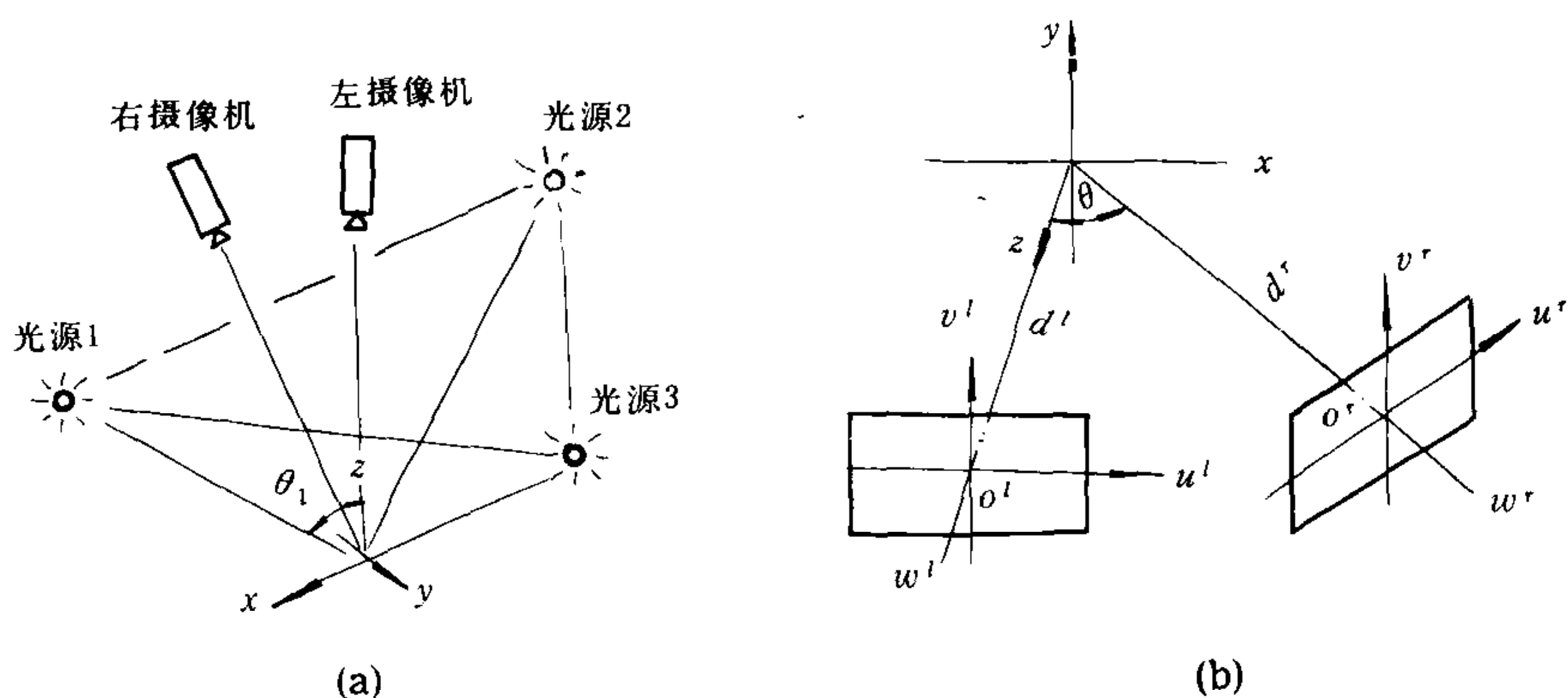


图 1 摄像机模型的设置

3 融合表面方向图确定3D 深度

3.1 融合表面方向图

如果用 PS 系统能够获得多幅表面方向图, 那么, 怎样把这些表面方向图融合成精确的深度图? 这是个比较复杂的问题. 为解决这一问题, 本文首先把表面方向图分割成与景物内物体对应的区域, 然后, 计算对应区域的视差并进行匹配, 最后利用迭代平滑法产生精细的表面深度图. 这种方法并非简单的积分, 而是一种基于表面方向及对应象素间表面方向差的一种平滑操作. 迭代等式的产生必须满足以下条件:

1) 观测的 (p, q) 应与 z 关于图象轴 x, y 的一个阶导数相一致, 这就是 (p, q) 的定义, 于是

$$S = (Z_x - p')^2 + (Z_y - q')^2 \quad (13)$$

在生成的精确针图中处处为“0”.

2) 左、右图象上一对对应象素应有相同的表面方向, 因为这些象素必须表示景物物体表面上同一物理点. 于是, 根据其物理意义可以得到式

$$d_p = (p'(ax + bZ + c, y) - p'(x, y))^2, \quad (14)$$

和
$$d_q = (q'(ax + bZ + c, y) - q'(x, y))^2 \quad (15)$$

应为“0”. 式中 $a = \cos\theta$, $b = \sin\theta$, $c = -d'\sin\theta$, (p', q') 和 (p^r, q^r) 是左、右表面方向图上的表面方向. 利用等式 (13)–(15), 研究与左坐标系统对应的价值函数, 于是有

$$e = \iint s + \lambda (d_p + d_q) dx dy. \quad (16)$$

利用世界坐标系统从右图象获得的针图公式

$$\bar{p}^r = \frac{ap^r - b}{a + bp^r}, \quad (17)$$

$$\bar{q}^r = \frac{q^r}{a + bp^r}, \quad (18)$$

可求出 \bar{p}^r 和 \bar{q}^r 值. 这样便可得到

$$\begin{aligned} d_p &= [p'(x, y) - \bar{p}^r(ax - bZ, y)]^2 \\ &= \left[p'(x, y) - \frac{ap^r(ax - bZ, y) - b}{bp^r(ax - bZ, y) + a} \right]^2, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} d_q &= [q'(x, y) - \bar{q}^r(ax - bZ, y)]^2 \\ &= \left[q'(x, y) - \frac{q^r(ax - bZ, y)}{bp^r(ax - bZ, y) + a} \right]^2. \end{aligned} \quad (20)$$

值得注意的是: d_p 和 d_q 是 $Z(x, y)$ 的函数, 式(16)中参数 s 与可积约束对应, 而 d_p 和 d_q 综合两个图象的信息以便使它们相互匹配. 对应于 d_p 和 d_q 的 Euler 项是

$$2 \left(p' - \frac{ap' - b}{bp' + a} \right) \frac{ab(bp' + a)(\partial p' / \partial u') - b^2(ap' - b)(\partial p' / \partial u')}{(bp' + a)^2} + 2 \left(q' - \frac{q'}{bp' + a} \right) \frac{b(bp' + a)(\partial q' / \partial u') - b^2q'(\partial p' / \partial u')}{(bp' + a)^2} \quad \left. \vphantom{\frac{ab(bp' + a)(\partial p' / \partial u') - b^2(ap' - b)(\partial p' / \partial u')}{(bp' + a)^2}} \right\} \text{Eqn. 1}$$

与式(16)对应的 Euler 等式为

$$\nabla^2 Z = (p'_x + q'_y) + \lambda \left[p' - \frac{ap' - b}{bp' + a} \cdot \frac{(a^2b + b^3)(\partial p' / \partial u')}{(bp' + a)^2} \right] + \lambda \left[\left(q' - \frac{q'}{bp' + a} \right) \cdot \frac{b(bp' + a)(\partial p' / \partial u') - b^2q'(\partial p' / \partial u')}{(bp' + a)^2} \right]. \quad (21)$$

此式为基于左针图含右针图修改项的非对称公式. 式中 $\begin{cases} u' = ax - bZ \\ v' = y \end{cases}$ 是表面点 $(x, y, Z(x, y))$ 在右图象平成成像位置, 量 p', q', p'_u 和 q'_v 是 $Z(x, y)$ 的函数并组成等式的非线性部分. 反之, 从带有左针图校正项的右针图也可以导出重建表面的类似公式.

3.2 确定物体表面的 3D 深度

如果能够直接获得立体图象对, 那么便可分步融合针图和深度图. 在此情况下, 每个系统产生一个针图及一个深度图. 为把这些针图及深度图进行融合, 我们利用以下算法求解左深度图和右深度图:

- 1) 计算 $p'_{n+1}, q'_{n+1}, p'_{n+1}, q'_{n+1}$.
- 2) 通过求解等式

$$\nabla^2 Z'_{n+1} = (p'_x + q'_y) + \lambda \left[p' - \frac{ap' - b}{bp' + a} \cdot \frac{(a^2b + b^3)(\partial p' / \partial u')}{(bp' + a)^2} \right] + \lambda \left[\left(q' - \frac{q'}{bp' + a} \right) \cdot \frac{b(bp' + a)(\partial p' / \partial u') - b^2q'(\partial q' / \partial u')}{(bp' + a)^2} \right] \quad \text{Eqn. 2}$$

在 (x, y, z) 坐标系内确定 3D 深度.

- 3) 通过求解

$$\nabla^2 Z'_{n+1} = (p'_u + q'_v) + \lambda \left[\left(p' - \frac{ap' - \bar{b}}{\bar{b}p' + a} \right) \cdot \frac{(a^2\bar{b} + \bar{b}^3)(\partial p' / \partial x)}{(\bar{b}p' + a)^2} \right] + \lambda \left[\left(q' - \frac{q'}{\bar{b}q' + a} \right) \cdot \frac{\bar{b}(\bar{b}p' + a)(\partial p' / \partial x) - \bar{b}^2q'(\partial p' / \partial x)}{(\bar{b}p' + a)^2} \right], \quad \text{Eqn. 3}$$

在右摄像机坐标系统内确定 3D 深度。

式中, 定义 $\bar{b} = -\sin\theta$, $p' = p'(au' - \bar{b}Z' + \bar{c}, y)$, $\bar{c} = d' \cdot \sin\theta$, λ 为不大于 1 的常数。

4) 使用中心差近似 (central difference approximation), 从 Z'_{n+1} 检查 \bar{p}'_{n+1} 和 \bar{q}'_{n+1} , 并利用 \bar{p}'_{n+1} 和 \bar{q}'_{n+1} 代替 p'_{n+1} 和 q'_{n+1} ;

5) 使用中心差近似从 Z'_{n+1} 检查 \bar{p}'_{n+1} 和 \bar{q}'_{n+1} , 并利用 \bar{p}'_{n+1} 和 \bar{q}'_{n+1} 代替 p'_{n+1} 和 q'_{n+1} ;

6) 返回第一步。

为减小误差, 参考点通常选择在表面方向分割图某个区域的质量中心附近。由于本文施加了多种约束, 收敛很易实现, 通常仅需 3—5 次迭代。

本文建议的算法是对称的、强迫可积的。算法能够融合从两个摄像机所获得的景物信息, 确定景物物体的表面方向并复原 3D 表面深度。

4 实验及结果

4.1 摄像机模型设置

本实验的摄像机模型设置 (camera model set up) 如图 1。设置左摄像机的图象平面平行于地面, 垂直于世界 (Global) 坐标系统的 z 轴, 右摄像机在左摄像机右边大约 40 厘米处, 图象平面倾斜 7 度使两个光轴能在世界坐标系统的原点处相交。视差转换为深度值的参数用实验方法确定。

在本实验中, 左和右摄像机的 3D Lookup 表各自独立建立。为提高运行速度, 3D Lookup 表选较低的空间分辨率: $16 \times 16 \times 16$ 。由于左摄像机坐标系统沿 z 轴平移外, 等同于世界坐标系统。实际上, 很易导出左摄像机坐标系统内梯度: $p' = p$, $q' = q$ 。而在右摄像机系统中, 由于坐标系统的相对旋转, 同一点处的方向与不同的 p 和 q 对应, 而 (p', q') 和 (p, q) 间的关系可利用坐标转换求出。变换常数根据左、右图象平面间的角度也很易计算出。

由于左摄像机的可见区域对于右摄像机也总可见, 因此光度体视系统可以观测到三个亮度值都高于某个阈值的区域, 极限角是包围此区域的球面圆周的半径; 左光度体视系统极限角为 50 度。由于以上约束, 左摄像机可视区对右摄像机同样可见。

4.2 系统的精度

该系统的实验精度依赖于光度体视系统各参数和测量精度。光度体视系统的精度通过确定倾斜各种不同角度的标准白板的表面方向进行测量。图 2 示出实验获得的角度和实际角度。图中表明光度体视系统能够确定的表面方向误差不大于 3° 。深度的精度利用确定已知块体的高度进行测量, 与实物深度相比较, 各块体误差大约为 11—13% 左右。图 3 示出测量的视差值和实际视差值, 图中水平轴表示 x -视差, 垂直轴表示 y -视差。 x -视差给出深度信息。虽然在理想情况下 y 方向的视差应为 0, 但由于两摄像机间垂直仰角, 系统产生 2.1 的平均视差。在 x 和 y 方向上均出现 0.7 个象素视差误差, 这一视差值对应于深度为 1 厘米的误差。值得注意的是由于质量中心位置用子象素 (subpixel) 分辨率确定, 因此视差也用这一分辨率确定。

前面的讨论是假定偏振线平行于图象平面内的扫描线。然而, 实际并不总平行于扫

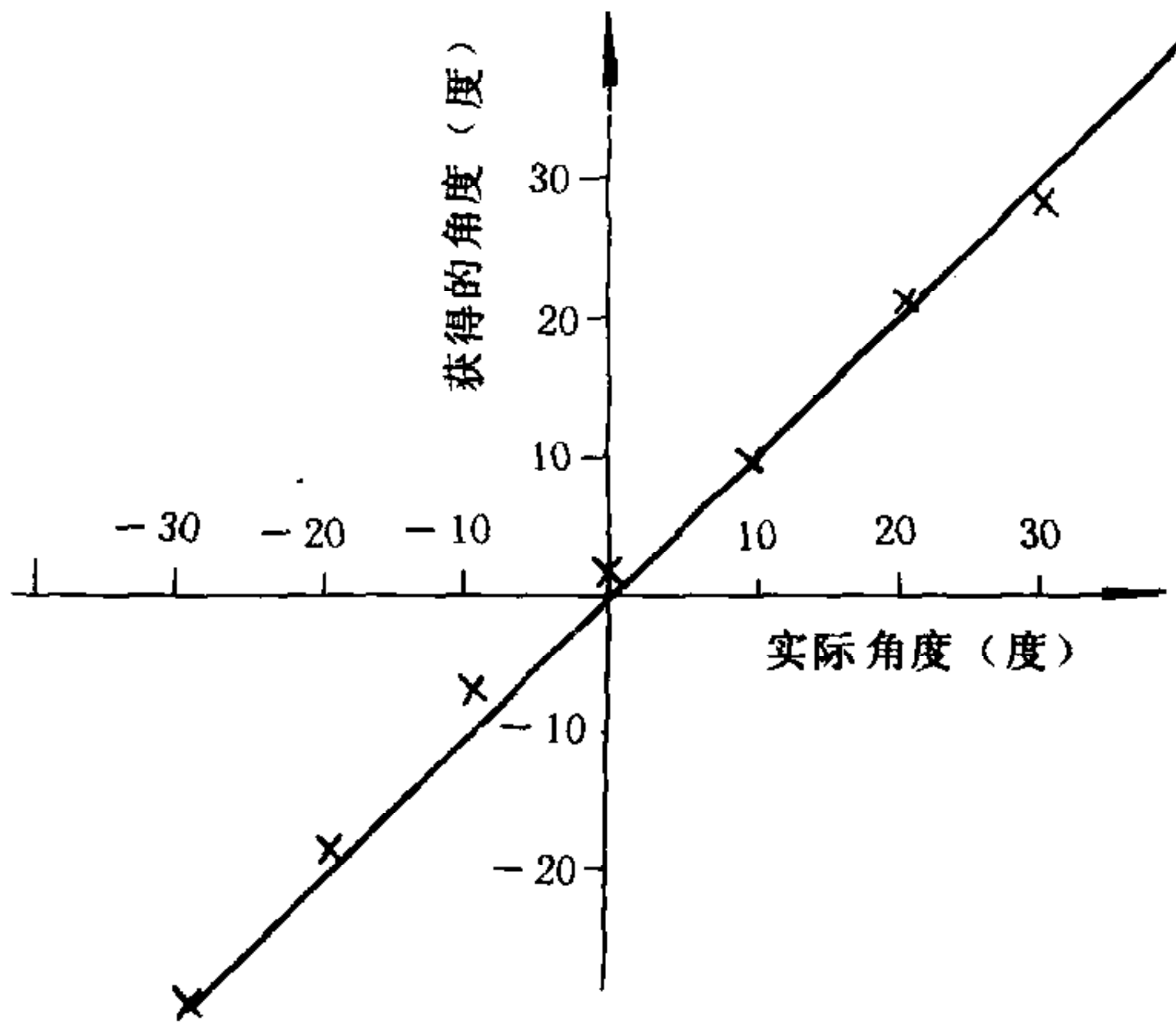


图2 角度测量精度

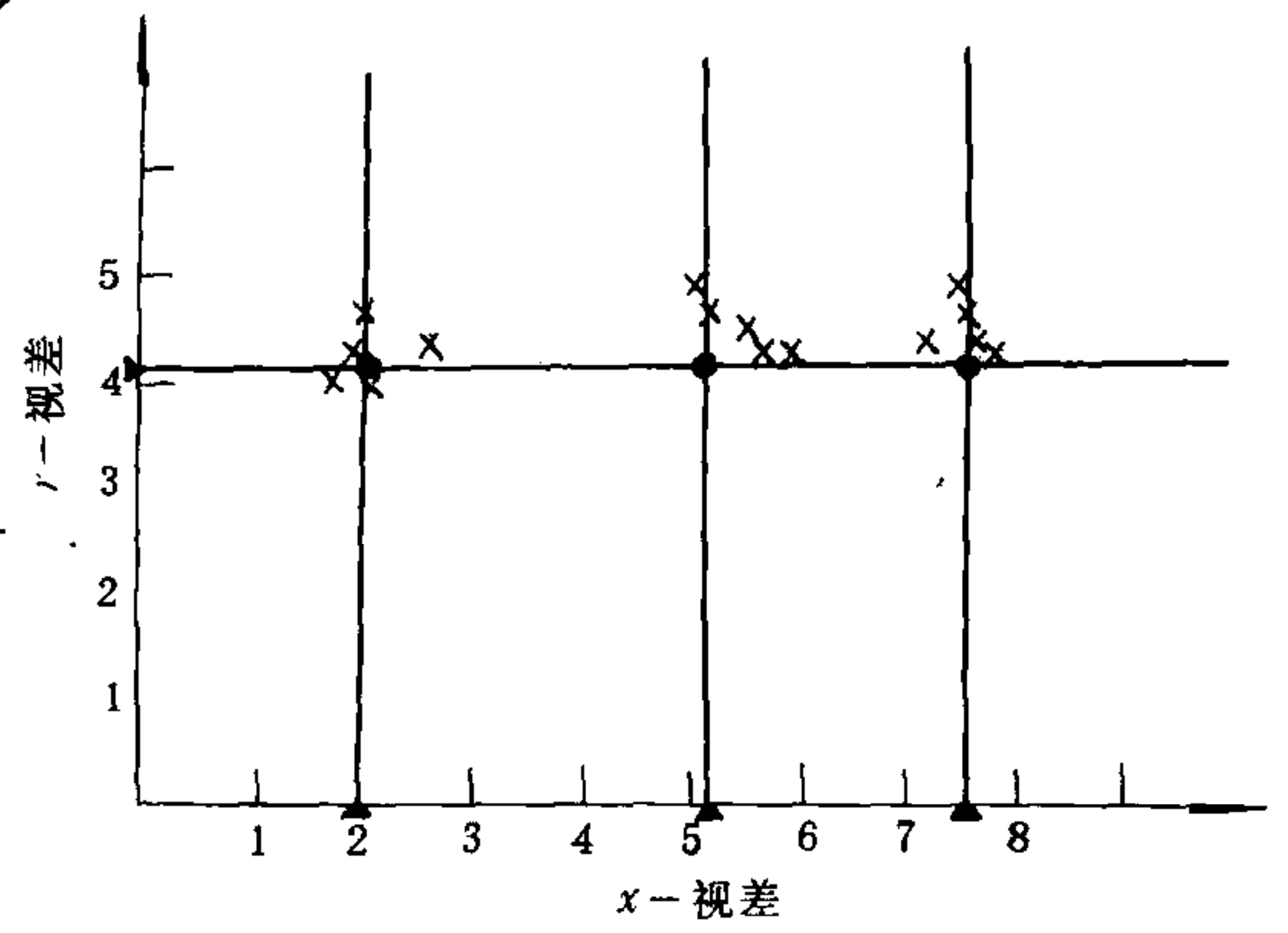


图3 深度测量误差

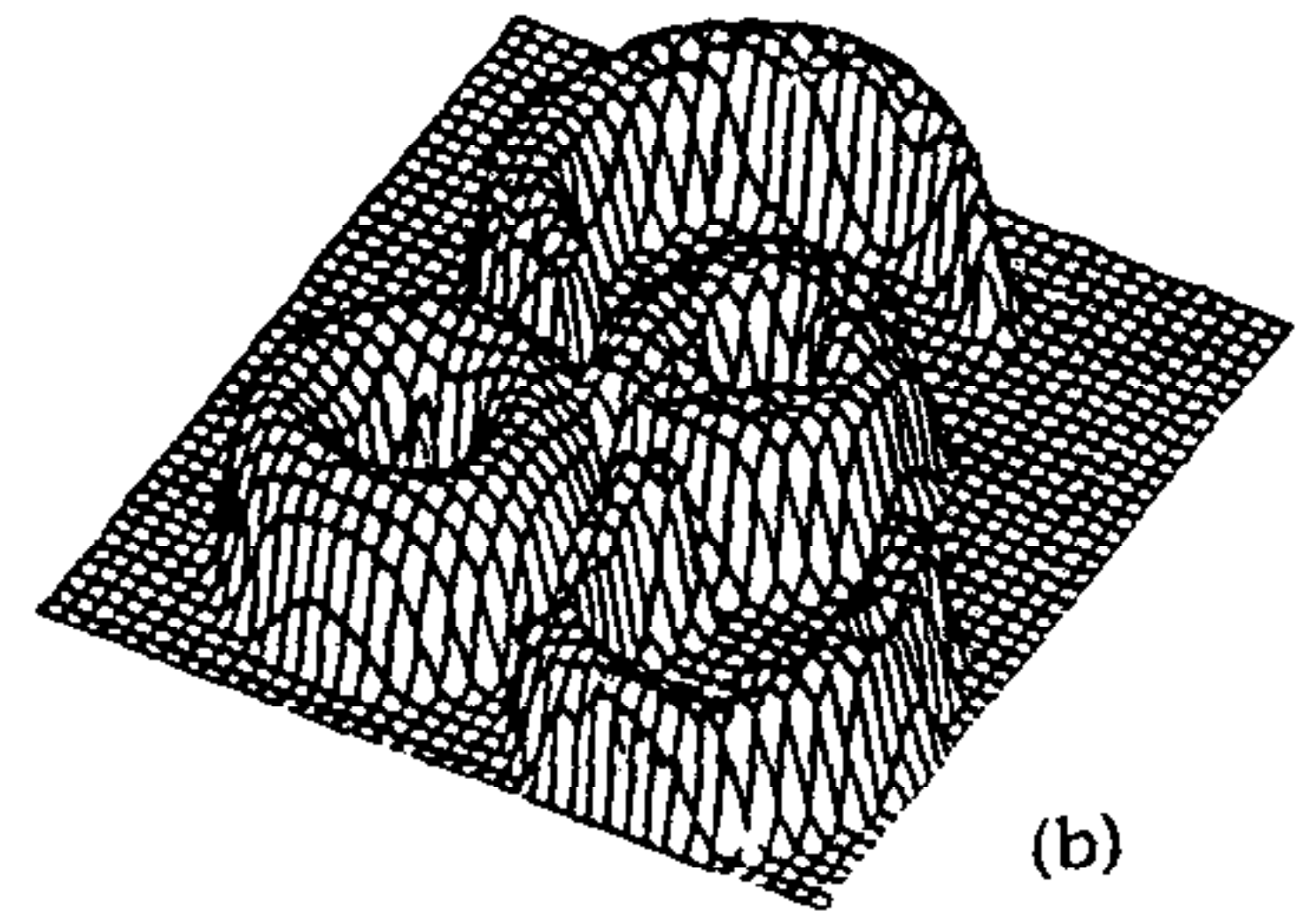
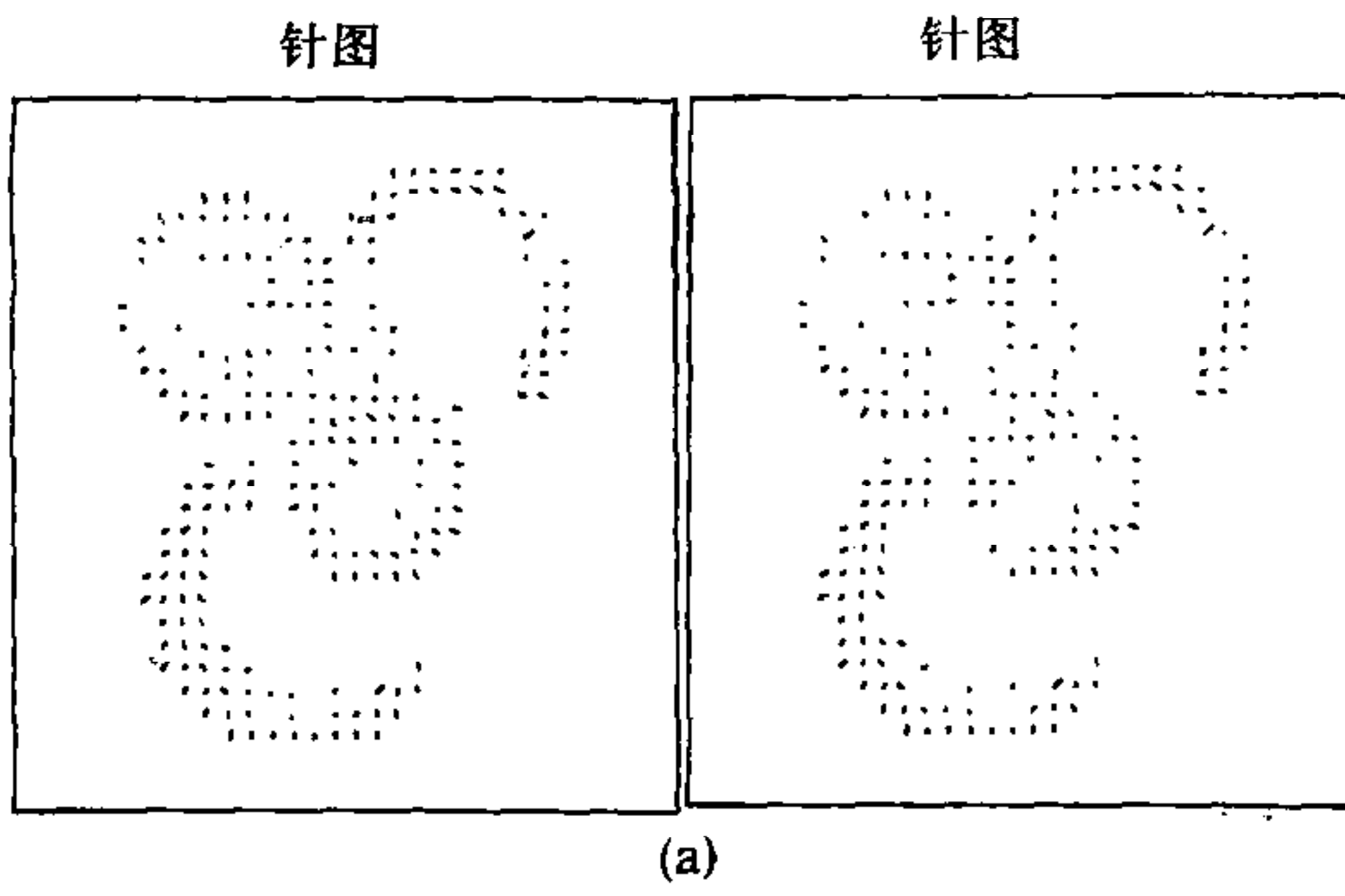
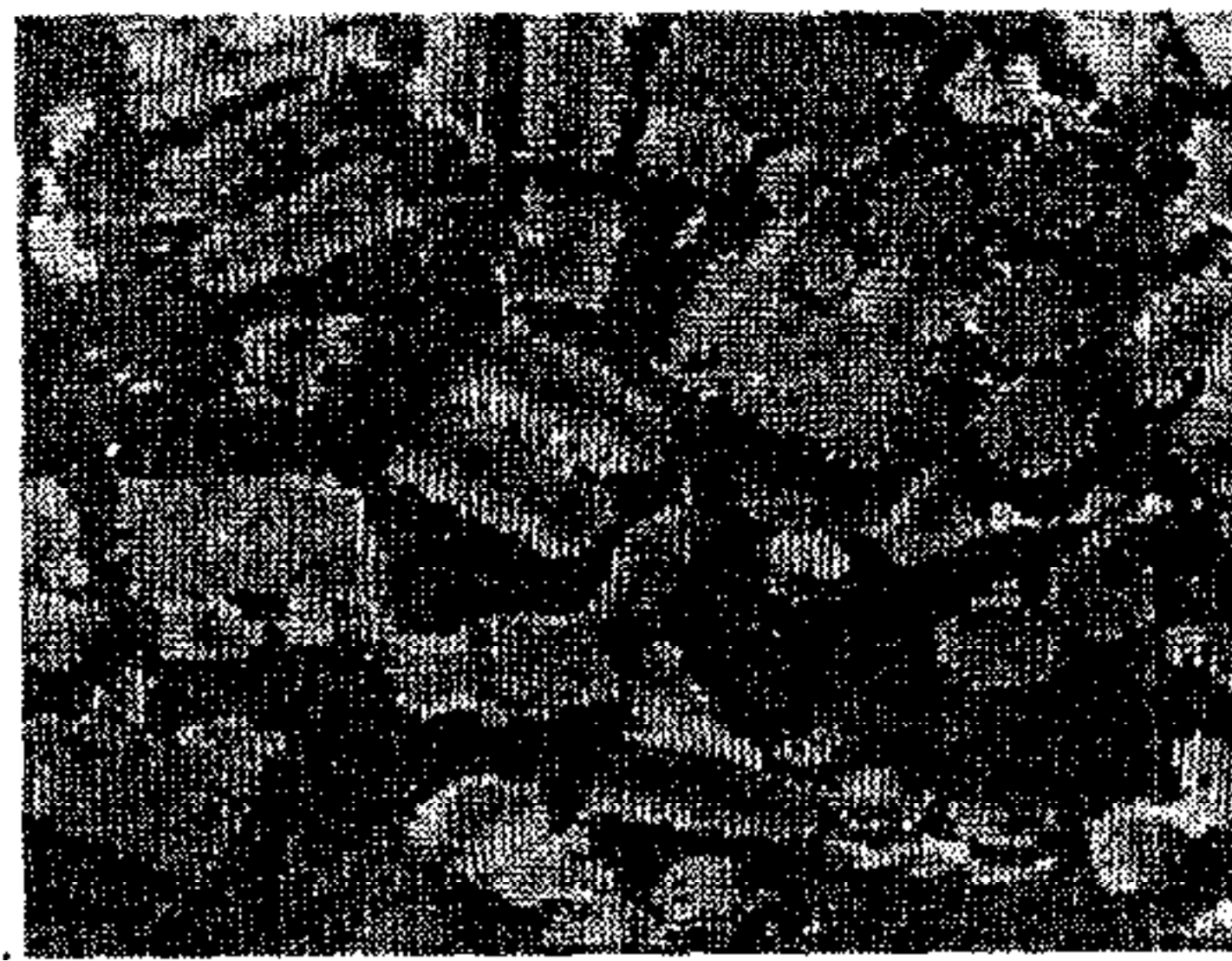
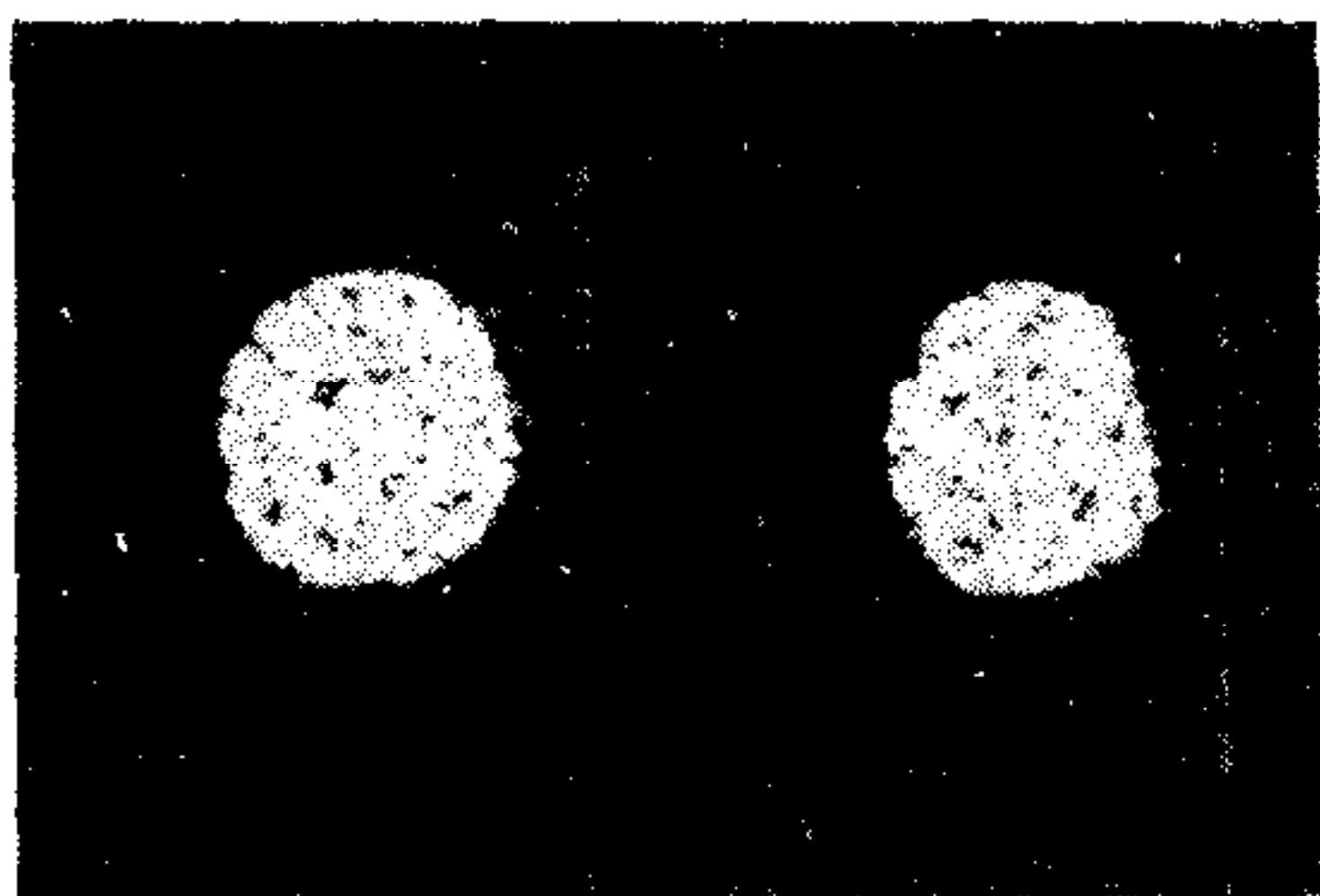


图4 (a) 分别由左、右摄像机获得的一对针图 (b) 由两针图重建的深度图



(a)



(b)

图5 由一对表面方向图 (a) 获得的一对分割的区域图 (b).

描线. 假如扫描线和偏振线在图象平面中心处相关并可用 $(dx)/z \tan \gamma$ 近似表示, 偏振线与扫描线最大差异就出现在图象的拐角处. 式中 x 是可观测区的物理长度, z 是点离摄像机的距离, d 是图象平面的尺寸, 而 γ 为 TV 摄像机的两图象平面间的夹角. 在本试验中, $x=15$ 厘米, $z=200$ 厘米, $d=64$ 象素, $\gamma=7$ 度. 因此偏振线与扫描线的最大相对差异同阶, 由于利用 SFS 技术, 因此, 这里可忽略非平行误差的影响.

4.3 实验结果

系统用于机械零件组成的景物, 景物内每个物体表面假定近似呈拉普拉斯特性, 利用左、右摄像机在三个位置不同的光源照射下获取三幅环形物体的景物图象. 然后产生两幅表面方向图和直接产生的深度图并用 NEEDMAP 和 3D PLOT 绘出, 如图 4 所示. 如果对积木块物体景物图象的两表面方向平滑滤波后, 可得到两幅分割的区域图, 如图 5 所示. 对每个分离的区域计算质量中心位置, 区域的尺寸和平均表面方向.

通过比较左右区域找出具有类似特性的区域对, 利用摄像机模型计算质量中心处水平视差, 并复原该处深度值, 图 6 示出生成的 3-D 深度图.

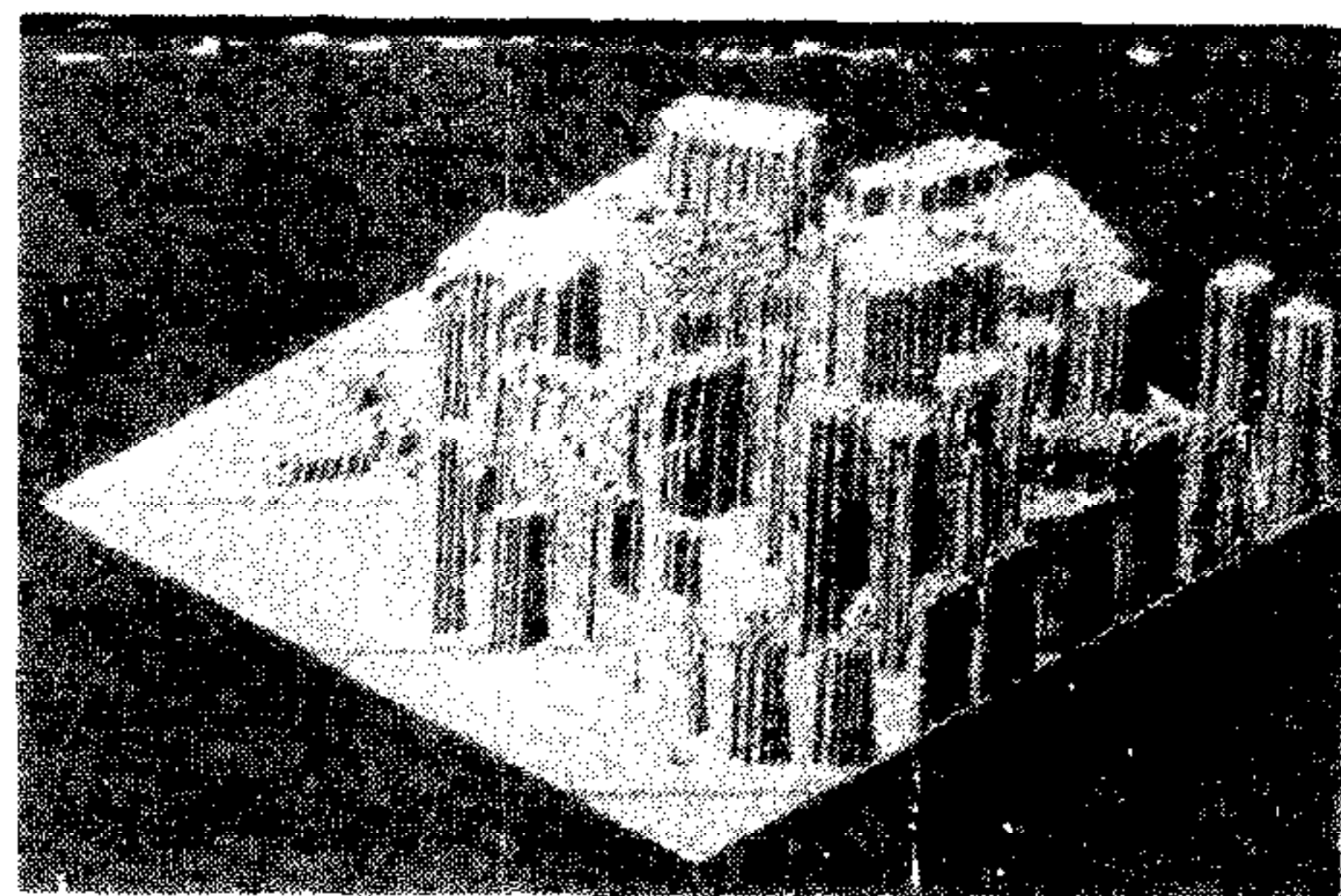
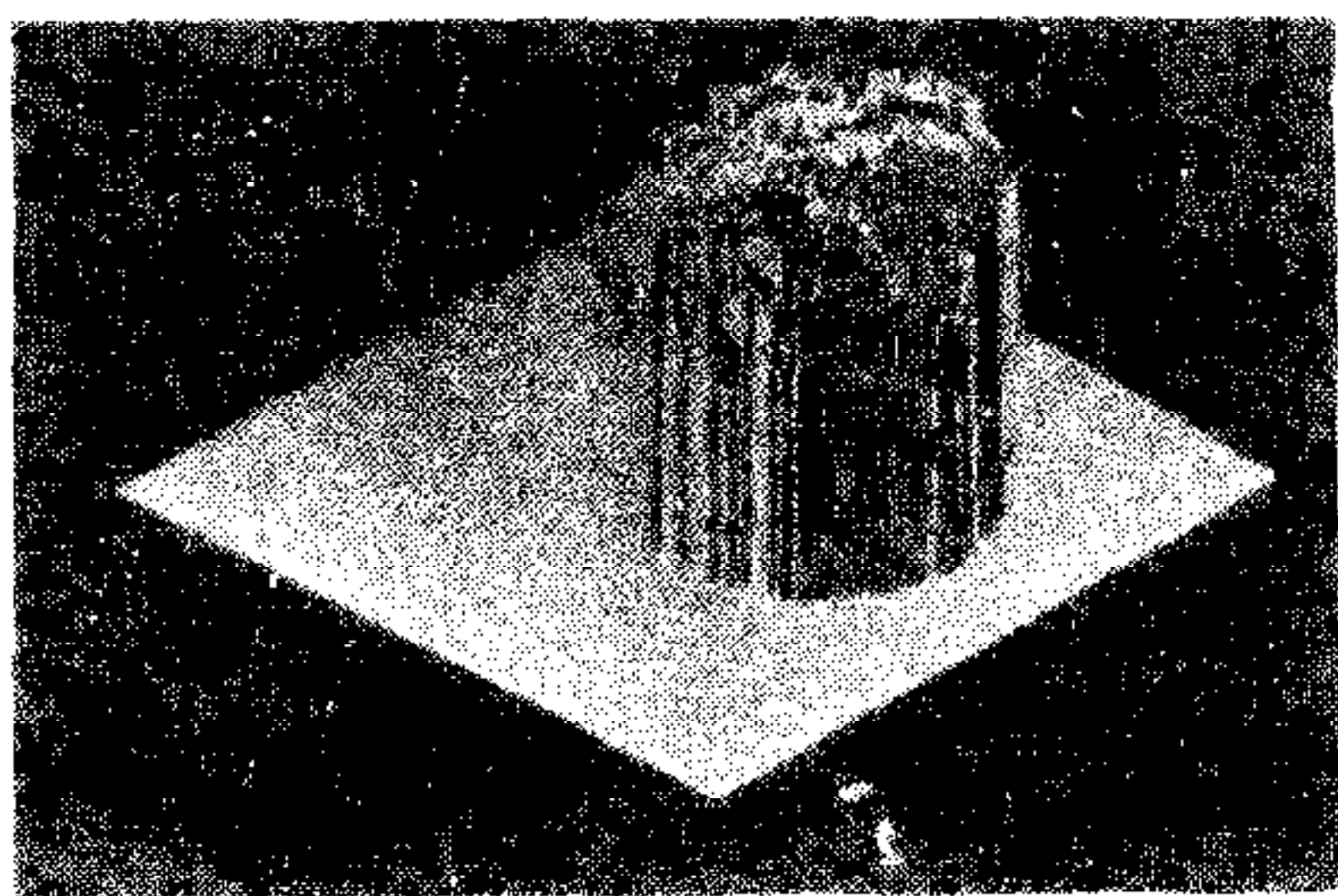


图 6 生成的 3D 表面深度图

5 结束语

本文提出的基于区域的光度体视方法能够综合地利用 BPS 及 PS 方法的各种优点, 成功地融合一对表面方向图, 实现对应区域间的视差匹配, 复原 3D 物体表面深度. 算法由以下几个步骤组成:

- 1) 利用双光度体视系统获得一对表面方向图.
- 2) 利用表面方向间断, 进行粗分割, 基于表面方向利用 geodesic dome 把两组分割的表面方向图细分割成孤立的区域.
- 3) 用于立体匹配的特征点是孤立区域的质量中心.
- 4) 利用区域约束、平均表面方向约束和偏振线约束提高了搜寻操作效率.
- 5) 处理遵循由粗到细的策略, 即先匹配根据表面方向间断进行粗分割生成的区域并产生粗深度图, 然后把这种粗深度图用作下阶段细分割的输入. 父-子约束用于限制搜索范围, 提高搜寻速度, 完成复原较精确的 3D 表面深度.

为进一步探索这一方法与技术, 我们正利用国外先进设备进行 BPS 与 SFS 各种融合技术的研究, 可望取得某些有重要意义的研究成果, 将另撰文详细讨论.

致谢 作者感谢美国马里兰大学自动化研究中心 A. Rosenfeld 教授对本文仔细阅读与修改, 以及复旦大学吴立德教授提出宝贵的修改意见。

参 考 文 献

- [1] 杨敬安, 曾湘燕, 张奠成. 利用光度立体法恢复物体3D 形状的研究. 模式识别与人工智能, 1991, 4 (2): 26—32.
- [2] K. Ikeuchi. Constructing a depth map from images. Technical Report, MIT AI Lab, 1983
- [3] K. Ikeuchi. Determining a depth map using a dual photometric stereo. Int. Journal of Robotics Research, 1987, 6 (1): 13—30.
- [4] 杨敬安, 张奠成. 三维计算机视觉. 合肥: 安徽教育出版社, 1994. 223—241.
- [5] K. Ikeuchi. B. P. K. Horn et al. Picking up an object from a pile of objects, MIT AI Lab. Memo 726, Cambridge, Mass, USA, 1983.
- [6] Jingan Yang. Parallel Matching algorithm of stereo vision using dynamical programming. Technical Report. CAR-TR-661, CS-TR-3045, Computer Vision Lab., Center for Automation Research, University of Maryland, USA, 1993.
- [7] 杨敬安, 张奠成. 基于特征的立体视觉并行匹配算法的研究. 电子学报, 1991, 19 (1): 32—38.

ON FUSING MULTIPLE NEEDLE MAPS FOR RECOVERING 3-D ABSOLUTE DEPTH

YANG JINGAN

(Hefei University of Technology, Hefei 230009)

ABSTRACT

The photometric stereo system can easily determine the surface orientation and relative depth of an object, but can not determine absolute depth. In order to determine absolute depth, this paper proposes an algorithm which obtains a pair of the needle maps between the corresponding areas in the two needle maps by binocular photometric stereo system, solves disparities between the corresponding areas in the two needle maps first and then fuses disparities correctly and match them accurately, finally reconstructs 3-D depth of the object surface. This method is very useful for as to conduct research on 3-D surface depth reconstruction and to recover scene structure.

Key words: Binocular photometric stereo system, global coordinate system, SFS algorithm, multiple needle maps for stereo images.



杨敬安 1969年毕业于合肥工业大学无线电系,现为该校人工智能所与计算机应用博士点教授,IEEE高级会员。长期从事计算机视觉、图象理解、模式识别、人工智能与机器人教学与研究工作,曾分别为罗马大学、意大利科学院 IESI 所、英国爱丁堡大学、马里兰大学自动化研究中心、卡内基-梅隆大学计算机学院的访问学者、访问科学家及访问教授等。发表学术论文 80 余篇,出版专著两部,完成多项国家自然科学基金项目及国际合作项目,并数次获奖,在多个国际学术组织内兼职。