

线性确定无穷远平面的 单应矩阵和摄像机自标定¹⁾

吴福朝 胡占义

(中国科学院自动化研究所模式识别国家重点实验室 北京 100080)

(E-mail: {fcwu, huzy}@nlpr.ia.ac.cn)

摘要 引入了一种新的对无穷远平面的单应性矩阵(The infinite homography)的约束方程并据此提出了一种新的摄像机线性自标定算法. 与文献中已有的方法相比, 该方法对摄像机的运动要求不苛刻(如不要求摄像机的运动为正交运动), 只须摄像机作一次平移运动和两次任意刚体运动, 就可线性唯一确定内参数. 该方法主要优点在于: 在确定无穷远平面的单应性矩阵的过程中, 不需要射影重构, 也不需要有限远平面信息, 唯一所需要的信息是图象极点, 从而简化了文献中现有的算法. 另外同时给出了由极点确定(运动组)关于无穷远平面单应性矩阵的充分必要条件. 模拟实验和实际图象实验验证了该方法的正确性和可行性.

关键词 摄像机自标定, 极点, 无穷远平面的单应性矩阵

中图分类号 TP391

LINEAR DETERMINATION OF THE INFINITE HOMOGRAPHY AND CAMERA SELF-CALIBRATION

WU Fu-Chao HU Zhan-Yi

(National Laboratory of Pattern Recognition(NLPR), Institute of Automation

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

(E-mail: {fcwu, huzy}@nlpr.ia.ac.cn)

Abstract In this paper, a new constraint on the homography of the plane at infinity is introduced and a new linear camera calibration technique is proposed based on it. Compared with the related techniques in the literature, the main advantages of our new technique are two-fold. Firstly, it is less stringent to hardware, for example, it does not require the camera to undertake orthogonal motions which are usually difficult to be done without special hardware support. In contrast, our technique requires only one translation, and two general motions of camera, which can be easily done, for example, with a hand-held camera. Secondly, in the determination of the homography of

1) 国家自然科学基金(60075004, 60033010)、“973”计划(G1998030502)和中国科学院机器人学开放研究实验室项目(RL200010)资助

收稿日期 2000-03-09 收修改稿日期 2001-09-10

the plane at infinity, it relies neither on projective reconstruction nor on the homography of a space plane, it needs only some image correspondences and epipoles, which are basic requirements for any camera self-calibration technique. In addition, we prove that for a given set of camera motions such as $\{(R, t^1), (R, t^2)\}$, if (t^1, t^2) are not linearly dependent, then the homography of the plane at infinity under this motion set can be linearly and uniquely determined. Simulations and experiments with real images validate our new method.

Key words Camera self-calibration, epipole, homography of the plane at infinity

1 引言

摄象机标定是从二维图象获取三维信息必不可少的步骤. 自从 1992 年 Hartley^[1]和 Faugeras^[2]首次提出摄象机自标定的思想后, 摄象机自标定及相关研究目前已成为计算机视觉领域的研究热点之一. 近年来在国际计算机视觉会议 (ICCV)、欧洲计算机视觉会议 (ECCV)、计算机视觉和模式识别会议 (CVPR)、国际模式识别会议 (ICPR) 以及相关领域的重要国际杂志上大量内容相关文章的问世充分说明了这一点^[1~16].

就目前摄象机自标定算法而言, 其本质均是基于绝对二次曲线 (The absolute conic) 或其对偶绝对二次曲面 (The absolute quadric) 的方法. 在这些算法中都需要解一个非线性方程组或解相应的非线性规划问题, 除噪声影响之外, 而且对初值的选择十分敏感. 近年来人们研究发现, 基于绝对二次曲线和基于绝对二次曲面的摄象机自标定方法往往很不鲁棒^[17]. 那么, 是否存在线性自标定方法呢? 由于线性方法计算简单, 在数值上比非线性方法稳定, 一直是摄象机定标所追求的目标. 针对这一问题, Ma^[16]首先利用主动视觉系统对摄象机运动的可控性, 提出了三正交平移运动的线性方法. 在普通的 Pan-Tilt-Translation 主动视觉平台上控制摄象机作三正交平移运动是难以实现的, 杨长江等人^[18]就此提出了一种改进方法, 要求摄象机作四组平移运动, 其中每组运动包括两次相互正交的平移, 利用极点仍可线性求解摄象机内参数. 但马和杨均是在四参数即畸变因子为零的摄象机模型下, 实现线性自标定. 在五参数的模型下, 利用他们的方法, 不可能线性求解. 对此, 吴福朝、李华等人在文献^[19]中利用场景的平面和极点信息, 提出控制摄象机作五组平移运动, 其中每组运动包括两次相互正交的平移运动, 线性求解摄象机所有 5 个内参数的方法. 上述这些线性方法中, 均需要利用主动视觉系统来控制摄象机作正交平移运动, 这极大地限制了这些方法在一般场合的应用. 吴福朝、胡占义在文献^[20]中给出了一种在一般实验平台上就可实现的线性自标定方法和理论, 在这种方法中只需摄象机作一次平移运动和两次任意刚体运动, 其核心是利用有限远平面的单应矩阵来确定 (运动组的) 无穷远平面的单应性矩阵. 最近, 我们在研究中发现, 标定过程中使用有限远平面信息和射影重构技术是不必要的, 仅利用图象的极点就可线性地确定 (运动组的) 无穷远平面的单应性矩阵, 这样就大大简化了现有摄象机自标定的线性算法. 本文将介绍这种新的摄象机线性自标定算法.

如图 1 所示, 摄象机作一次平移运动 (I, t) 和两次任意刚体运动 $(R_1, t^1), (R_2, t^2)$, 这三

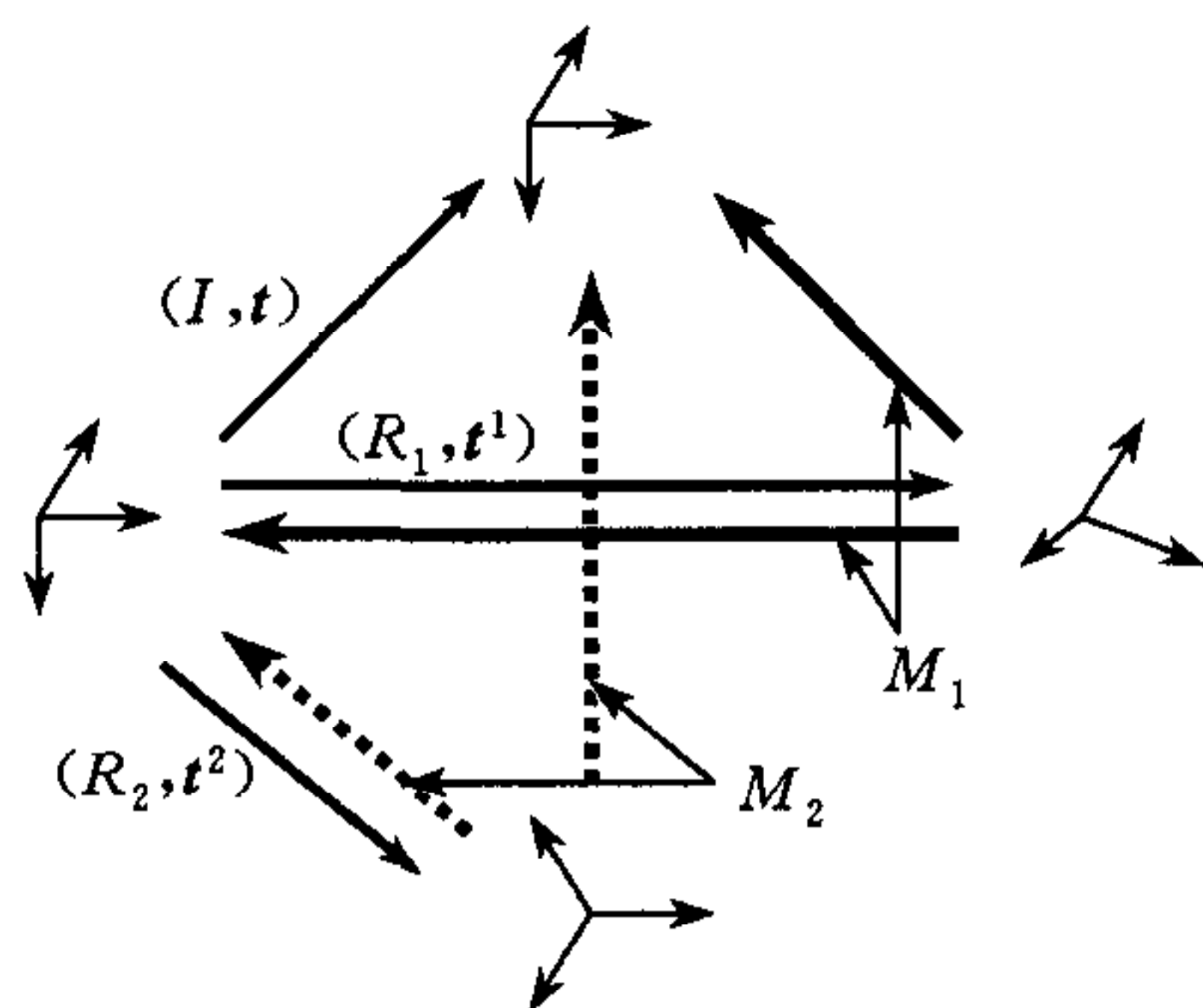


图 1 $(I, t), (R_1, t^1), (R_2, t^2)$ 三次运动
等价于 M_1, M_2 二组运动

次运动等价于下述两组运动

$$M_1 = ((R_1^T, -R_1^T t^1), (R_1^T, -R_1^T t^1 + t)),$$

$$M_2 = ((R_2^T, -R_2^T t^1), (R_2^T, -R_2^T t^2 + t)).$$

其中 M_1, M_2 每组运动中的二次运动具有相同的旋转矩阵.

因此不失一般性,当摄像机作一次平移运动和两次任意刚体运动时,我们总约定为摄像机是作两组如下的运动

$$M_1 = ((R_1, t^{11}), (R_1, t^{12})),$$

$$M_2 = ((R_2, t^{21}), (R_2, t^{22})).$$

2 无穷远平面的单应性矩阵

2.1 约束方程

本文为了分析方便,当给定一组摄像机运动时,我们称摄像机运动前拍摄的图象为第一幅图象,摄像机运动后拍摄的图象为第二幅图象.令 (R, t) 为摄像机的运动, e 为第二幅图象上的极点,则 $H_\infty = KRK^{-1}$ 是无穷远平面关于两幅图象间的单应性矩阵. 设 $m_i, m'_i, i=1, 2, \dots, N$ 为两幅图象间的一组对应点,由于 $F = [e]_\times H_\infty$ 是基本矩阵,所以存在 $u_i^\infty, i=1, 2, \dots, N$ 使得 $[e]_\times H_\infty m_i = u_i^\infty e \times m'_i$, 即

$$[e]_\times (H_\infty m_i - u_i^\infty m'_i) = 0,$$

于是存在 $v_i^\infty, i=1, 2, \dots, N$, 使

$$H_\infty m_i - u_i^\infty m'_i - v_i^\infty e = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N.$$

上式说明: $(H_\infty, -u_1^\infty, -v_1^\infty, -u_2^\infty, -v_2^\infty, \dots, -u_N^\infty, -v_N^\infty)$ 是方程组

$$Hm_i + u_i m'_i + v_i e = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N \tag{1}$$

的解. 我们称方程(1)为无穷远平面单应性矩阵的约束方程.

引理 1. H^* 是某一平面的单应性矩阵,则存在 $u_i, v_i, i=1, 2, \dots, N$ 使得 $(H^*, u_1, v_1, u_2, v_2, \dots, u_N, v_N)$ 是方程组(1)的解. 反之,若 $(H^*, u_1, v_1, u_2, v_2, \dots, u_N, v_N)$ 是方程组(1)的解,则 H^* 也必为某个平面的单应性矩阵.

证明. 引理 1 的前半部分的证明,与上面的推导过程完全相同,这里仅证明后半部分. 若 $(H^*, u_1, v_1, u_2, v_2, \dots, u_N, v_N)$ 是方程组(1)的一组解,则必有

$$[e]_\times H^* m_i = -u_i [e]_\times m'_i,$$

于是有

$$m_i'^T [e]_\times H^* m_i = 0,$$

所以 $[e]_\times H^*$ 为基本矩阵. 令 H^{**} 是某个平面 Π 的单应性矩阵,则 $F^{**} = [e]_\times H^{**}$ 是基本矩阵,由于基本矩阵在相差一个常数因子下是唯一的,所以存在标量 s ,使得

$$s[e]_\times H^{**} = [e]_\times H^*,$$

于是存在向量 a ,使得

$$H^* = sH^{**} + ea^T,$$

令 $H^{**} = KRK^{-1} + K \frac{tn^T}{d} K^{-1}$ (n 是平面 Π 的单位法向量, d 是摄像机运动前坐标系的坐标

原点到平面 Π 的距离) $b = Ka$, 因 $e = uKt$, 所以必有

$$H^* = s \left(KRK^{-1} + K \frac{tn^{1T}}{d_1} K^{-1} \right),$$

其中 $n^1 = \frac{\frac{n^T}{d} + \frac{ub}{s}}{\left\| \frac{n^T}{d} + \frac{ub}{s} \right\|}$, $d_1^{-1} = \left\| \frac{n^T}{d} + \frac{ub}{s} \right\|$, 故 H^* 是法向量为 n^1 、距摄像机运动前坐标系的坐标

原点距离为 d_1 的平面的单应性矩阵.

引理 1 的前半部分说明, 方程(1)有无穷多组解. 因此, 摄像机的一次运动 (R, t) , 不能确定无穷远平面的单应性矩阵 $H_\infty = KRK^{-1}$.

令摄像机作一组运动 $M = \{(R, t^i) | i = 1, 2\}$, 这组运动中每次运动下的无穷远平面的单应性矩阵是相同的, 均为 $H_\infty = KRK^{-1}$, 由引理 1, 对于 H_∞ , 必存在 $u_i^{1\infty}, v_i^{1\infty}, u_i^{2\infty}, v_i^{2\infty}$, $i = 1, 2, \dots, N$ 使得 $(H_\infty, u_1^{1\infty}, v_1^{1\infty}, u_2^{1\infty}, v_2^{1\infty}, \dots, u_N^{1\infty}, v_N^{1\infty}, u_1^{2\infty}, v_1^{2\infty}, u_2^{2\infty}, v_2^{2\infty}, \dots, u_N^{2\infty}, v_N^{2\infty})$ 是下述联立方程组(2), (3)的解.

$$Hm_i^1 + u_i^1 m_i'^1 + v_i^1 e^1 = 0 \quad (2)$$

$$Hm_i^2 + u_i^2 m_i'^2 + v_i^2 e^2 = 0 \quad (3)$$

其中 $m_i^1, m_i'^1, i = 1, 2, \dots, N$ 为对应于运动 (R, t^1) 的一组图象对应点, $m_i^2, m_i'^2, i = 1, 2, \dots, N$ 为对应于运动 (R, t^2) 的一组图象对应点. 证毕.

我们可否从联立方程组(2), (3)唯一确定 H_∞ , 这是我们要讨论的问题.

2.2 唯一解的充要条件

引理 2. 若 H^1 为运动 (R, t^1) 下关于某个有限远平面的单应性矩阵, H^2 为运动 (R, t^2) 下关于某个有限平面的单应性矩阵, 当 $t^i, i = 1, 2$ 线性无关时, 必有 $H^1 \neq \lambda_0 H^2$, 其中 λ_0 为一常数因子.

证明. 设运动 (R, t^1) 下某个有限平面 π_1 的方程为: $n^{1T}x = d_1$, 运动 (R, t^2) 下某个有限平面 π_2 的方程为 $n^{2T}x = d_2$, 则 π_1 在 (R, t^1) 下的单应性矩阵为

$$H^1 = s_1 K \left(R + \frac{t^1 n^{1T}}{d_1} \right) K^{-1},$$

π_2 在 (R, t^2) 下的单应性矩阵为

$$H^2 = s_2' K \left(R + \frac{t^2 n^{2T}}{d_2} \right) K^{-1}.$$

若 $H^1 = \lambda_0 H^2$, 则必有

$$s_1 K \left(R + \frac{t^1 n^{1T}}{d_1} \right) K^{-1} = s_2 K \left(R + \frac{t^2 n^{2T}}{d_2} \right) K^{-1}, \quad (s_2 = \lambda_0 s_2'),$$

于是

$$(s_1 - s_2)R = s_2 \frac{t^2 n^{2T}}{d_2} - s_1 \frac{t^1 n^{1T}}{d_1}.$$

因

$$\text{rank} \left(s_2 \frac{t^2 n^{2T}}{d_2} - s_1 \frac{t^1 n^{1T}}{d_1} \right) \leq \text{rank} \left(s_2 \frac{t^2 n^{2T}}{d_2} \right) + \text{rank} \left(-s_1 \frac{t^1 n^{1T}}{d_1} \right) = 2,$$

$$\text{rank} R = 3,$$

所以必有 $s_1 = s_2$, 于是 $\frac{t^2 n^{2T}}{d_2} = \frac{t^1 n^{1T}}{d_1}$, 从而有 $\frac{t^2 n^{2T} n^2}{d_2} = \frac{t^1 n^{1T} n^1}{d_1}$. 因 $n^{2T} n^2 = 1$, 所以 $t^2 = \frac{n^{1T} n^2 d_2}{d_1} t^1$, 即 $t^i, i = 1, 2$ 线性相关, 矛盾. 所以, $H^1 \neq \lambda_0 H^2$. 证毕.

引理 3. 若 $t^i, i=1, 2$ 线性相关, 则方程(2), (3)分别存在解 $(H^1, u_1^1, v_1^1, u_2^1, v_2^1, \dots, u_N^1, v_N^1)$ 与 $(H^2, u_1^2, v_1^2, u_2^2, v_2^2, \dots, u_N^2, v_N^2)$, 使 $H^1 = H^2$ 且 H^1, H^2 分别为有限远平面的单应性矩阵.

证明. 对空间中任一张有限远平面 Π_1 , 令 H^1 是运动 (R, t^1) 下关于 Π_1 的单应性矩阵, 由引理 1 的前半部份, 存在 $u_i^1, v_i^1, i=1, 2, \dots, n$ 使得 $(H^1, u_1^1, v_1^1, u_2^1, v_2^1, \dots, u_N^1, v_N^1)$ 是(2)的解. 由于

$$H^1 = s_1 K \left(R + \frac{t^1 n^{1T}}{d_1} \right) K^{-1},$$

因 $t^i, i=1, 2$ 线性相关, 所以存在常数 a 使得 $t^1 = at^2$, 代入上式有

$$H^1 = s_1 K \left(R + \frac{at^2 n^{1T}}{d_1} \right) K^{-1} = s_1 K \left(R + \frac{t^2 n^{2T}}{d_2} \right) K^{-1},$$

其中 $n^2 = \frac{a}{|a|} n^1, d_2 = |a|^{-1} d_1$.

因此, H^1 是运动 (R, t^2) 下关于平面 Π_2 (其法向量为 n^2 , 距坐标原点的距离为 d_2) 的单应性矩阵. 于是由引理 1 的前半部份, 存在 $u_i^2, v_i^2, i=1, 2, \dots, n$ 使得 $(H^1, u_1^2, v_1^2, u_2^2, v_2^2, \dots, u_N^2, v_N^2)$ 是式(3)的解. 证毕.

唯一性定理. 联立方程组(2), (3)关于 H 有唯一解的充要条件是 $t^i, i=1, 2$ 线性无关.

证明. 充分性: 显然式(2), (3)必有解: $(H_\infty, u_1^{1\infty}, v_1^{1\infty}, \dots, u_N^{1\infty}, v_N^{1\infty}, u_1^{2\infty}, v_1^{2\infty}, \dots, u_N^{2\infty}, v_N^{2\infty})$, 令 $(H^*, u_1^{1*}, v_1^{1*}, \dots, u_N^{1*}, v_N^{1*}, u_1^{2*}, v_1^{2*}, \dots, u_N^{2*}, v_N^{2*})$ 是式(2), (3)的另一解, 由引理 2, 则 H^* 不可能是两个运动下关于有限平面的单应性矩阵, 于是 $H^* = sH_\infty$. 故充分性成立.

必要性: 若 $t^i, i=1, 2$ 线性相关, 由引理 3, 联立方程组(2), (3)的解不唯一, 故必要性成立. 证毕.

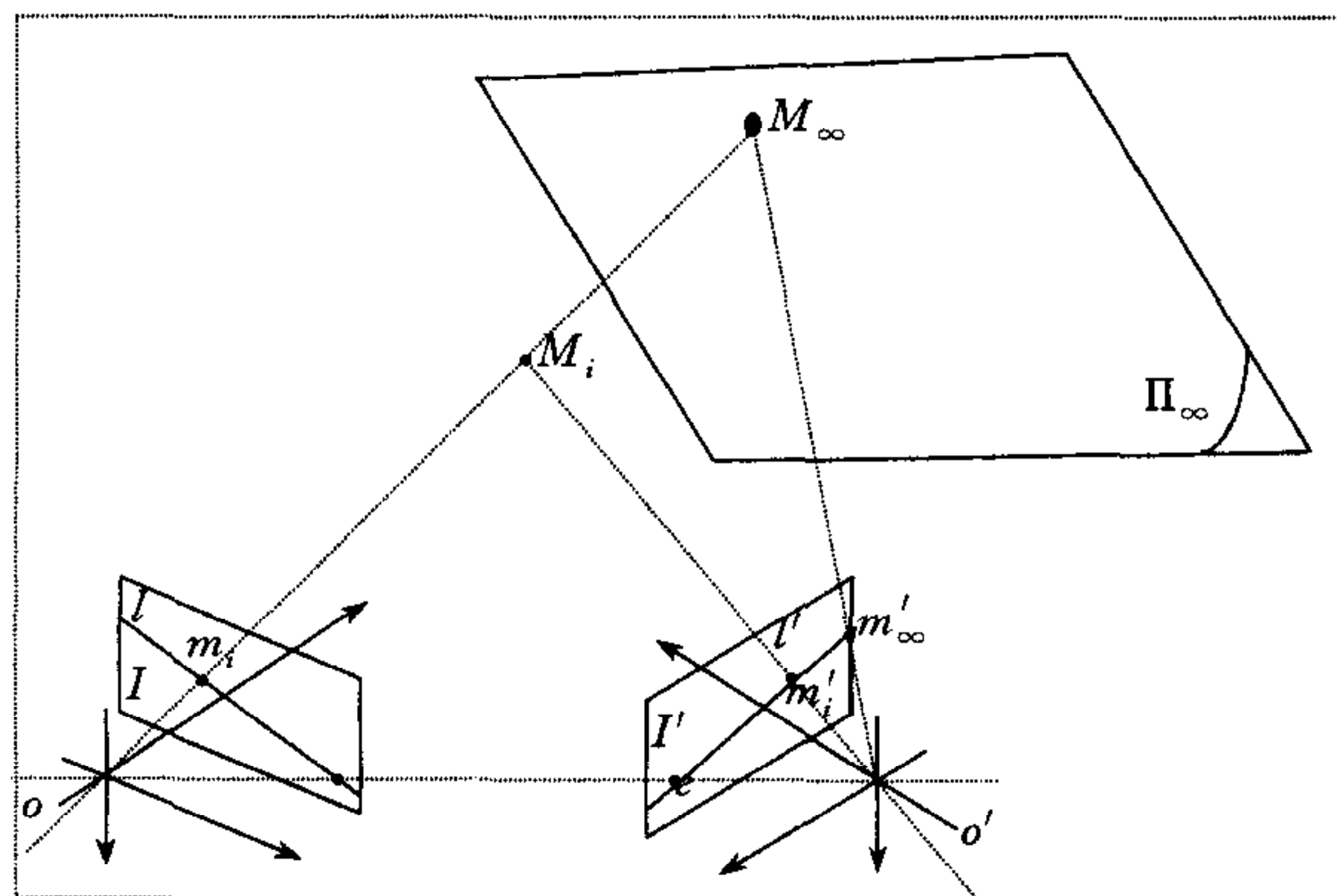
2.3 求解 H_∞ 的算法

- 1) 计算运动组 $M = \{(R, t^1), (R, t^2)\}$ 下的二个极点 e^1, e^2 ;
- 2) 解线性联立方程组(2), (3), 确定该运动组下关于无穷远平面的单应性矩阵 H_∞ .

2.4 新约束方程的几何解释

在第 2.1 节, 我们从代数观点出发, 说明无穷远平面的单应性矩阵 H_∞ 是约束方程(1)的一个解. 下面从几何的观点出发, 解释为什么 H_∞ 会是约束方程(1)的解.

约束方程(1)从本质上是对极约束(Epipolar Constraint)的一种变形. 方程(1)说明点 Hm_i 一定通过由点 m'_i 和极点 e 确定的直线, 即极线 l' , 如图 2 所示. 当 $H = H_\infty$ 时, 为什么点 $H_\infty m_i$ 一定会通过 l' 呢? 这是因为在图 2 中, 假定 m_i, m'_i 分别是空间点 M_i 在第一幅图象和



第二幅图象的投影. 由于连接 (m_i, M_i) 的直线(即点 M_i 在第一幅图象的投影线)必然交于无穷远平面 Π_∞ 于一点, 记为 M_∞ , 则 M_∞ 在第一幅图象上的投影必为 m_i , 所以, $H_\infty m_i$ 表示 M_∞ 在第二幅图象上的投影. 由于 M_∞ 位于由空间点 M_i 和摄像机光心 o, o' 确定的平面上, 所以 M_∞ 在第二幅图象上的投影, 即 $H_\infty m_i$ 必然通过 l' . (注. 由 M_i 和 o, o' 确定的平面上的所有点在第二幅图象上的投影均在 l' 上). 所以, 给定二幅图象, 对任意的一对图象对应点 (m_i, m'_i) ,

图 2 m_i 与 M_i 的连线交无穷远平面 Π_∞ 于 M_∞ 点, M_∞ 在第二幅图像的投影为 m'_∞, m'_∞ 在极线 l' 上, 且 $m'_\infty \approx H_\infty m$

下列等式恒成立

$$Hm_i + u_i m'_i + v_i e = 0.$$

上述即为约束方程(1)的一种几何解释.从上面的解释不难看出,对于任一空间平面 π ,如果 π 不通过光心 o, o' ,则平面 π 的单应性矩阵 H_π 同样会满足约束(1).这也说明为什么给定二幅图象,无穷远平面的单应性矩阵 H_∞ 不能从约束(1)解出的缘故.我们必须给出二组形如 $(R, t^1), (R, t^2)$ 的摄像机运动,才能唯一确定 H_∞ .

3 摄像机自标定的线性算法

3.1 自标定的线性理论

摄像机作两组运动 $M_1 = \{(R_1, t^{11}), (R_1, t^{12})\}, M_2 = \{(R_2, t^{21}), (R_2, t^{22})\}$.

若 $T_1 = \{t^{11}, t^{12}\}, T_2 = \{t^{21}, t^{22}\}$ 是两个线性无关组,根据前一节的讨论,可计算出两组运动下无穷远平面所对应的二个单应性矩阵 H_∞^1, H_∞^2 ,因

$$H_\infty^1 = KR_1K^{-1}, \quad H_\infty^2 = KR_2K^{-1} \quad (4)$$

于是

$$H_\infty^1 K = KR_1, \quad H_\infty^2 K = KR_2 \quad (5)$$

两边转置

$$K^T H_\infty^{1T} = R_1^T K^T, \quad K^T H_\infty^{2T} = R_2^T K^T \quad (6)$$

从(5),(6)两式,可导致关于内参数的线性约束方程

$$H_\infty^1 C H_\infty^{1T} = C, \quad H_\infty^2 C H_\infty^{2T} = C \quad (7)$$

其中 $C = KK^T$,令 $C = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 \\ c_2 & c_4 & c_5 \\ c_3 & c_5 & 1 \end{bmatrix}$.

若 R_1, R_2 的旋转轴不同,根据文献[21],方程组(7)有唯一解 C^* ,对 C^* 进行Cholesky分解: $C^* = K^* K^{*T}$,则摄像机的内参数矩阵 $K = K^*$,于是我们有下述线性自标定理论

自标定定理. 摄像机作两组运动 $M_1 = \{(R_1, t^{11}), (R_1, t^{12})\}, M_2 = \{(R_2, t^{21}), (R_2, t^{22})\}$,若满足两个条件:1) $T_1 = \{t^{11}, t^{12}\}, T_2 = \{t^{21}, t^{22}\}$ 是两个线性无关组;2) R_1, R_2 的旋转轴不相同,则可线性地唯一确定摄影机内参数矩阵 K .

3.2 摄像机自标定算法

总结上述讨论,有下述自标定算法

- 1) 摄像机作两组运动: $M_1 = \{(R_1, t^{11}), (R_1, t^{12})\}, M_2 = \{(R_2, t^{21}), (R_2, t^{22})\}$;
- 2) 根据第2.3节算法,确定两组运动下无穷远平面的单应性矩阵 H_∞^1, H_∞^2 ;

- 3) 求解线性方程组(7),得: $C^* = \begin{bmatrix} c_1^* & c_2^* & c_3^* \\ c_2^* & c_4^* & c_5^* \\ c_3^* & c_5^* & 1 \end{bmatrix}$;

- 4) 对 C^* 进行cholesky分解求解内参数阵 K .

4 模拟实验与真实图象实验

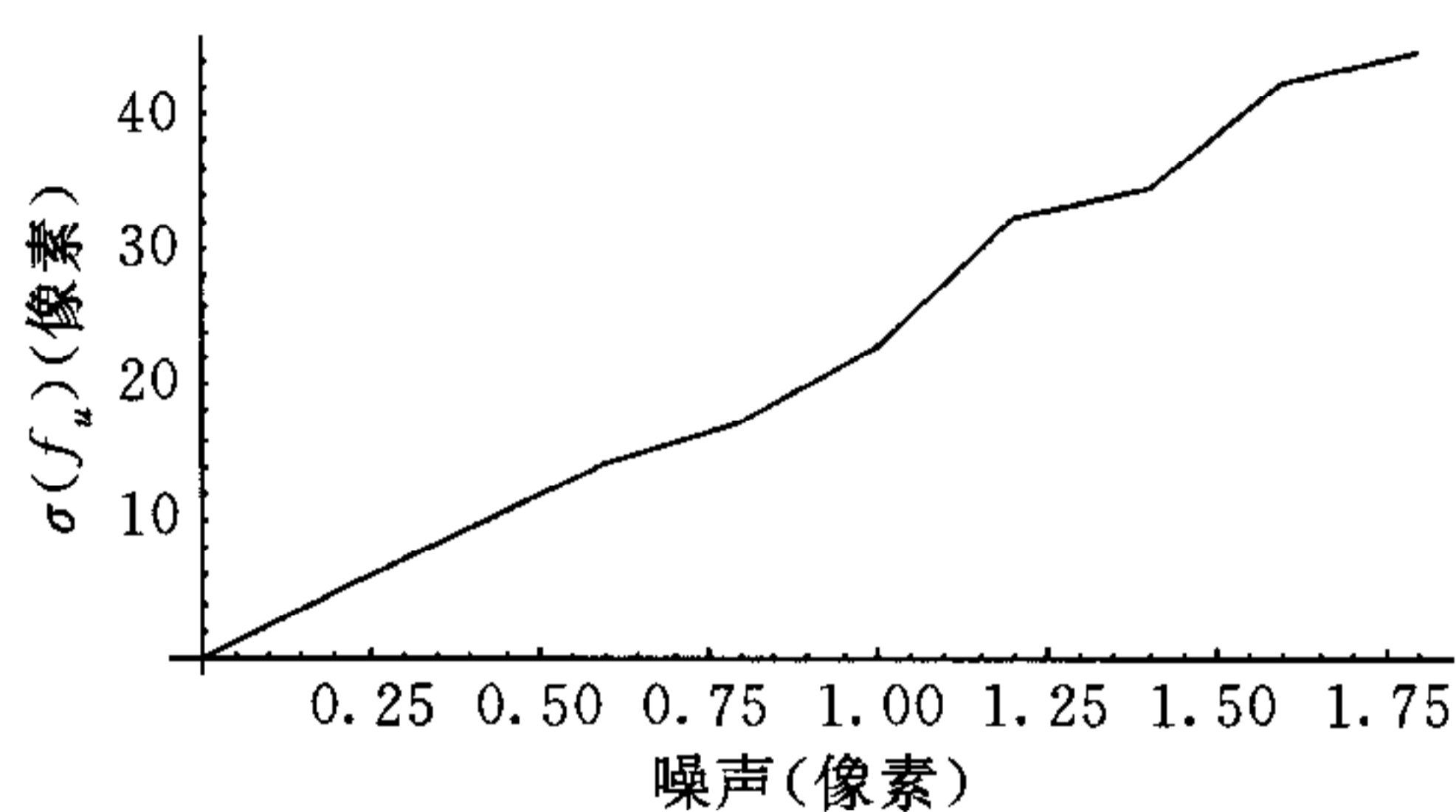
4.1 模拟实验

在模拟数据实验中,摄像机的内参数为: $f_u = 1\ 000, f_v = 1\ 000, s = 0.02, u_0 = 0, v_0 = 0$,图

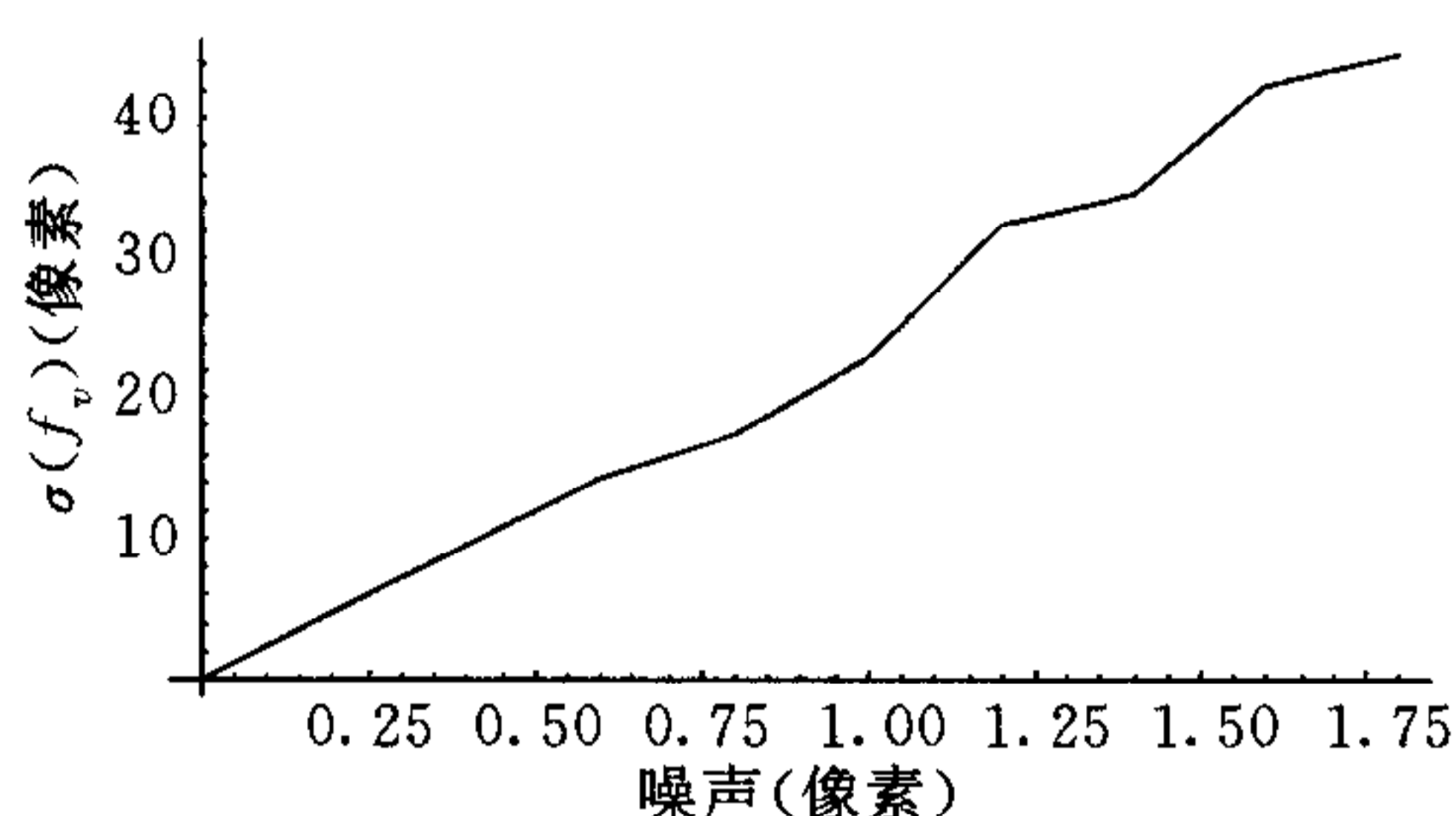
象大小为 $1\ 280 \times 960$ 个象素. 为了检验算法的鲁棒性, 对图象数据加入随机均匀噪声(单位: 象素). 每种噪声水平下试验 500 次. 表 1 是关于内参数的实验结果. 图 3 是内参数绝对误差均值随噪声的变化曲线. 模拟实验结果表明: 本文算法有很好的鲁棒性.

表 1 内参数的模拟实验结果(每种噪声水平下 500 次实验的均值)

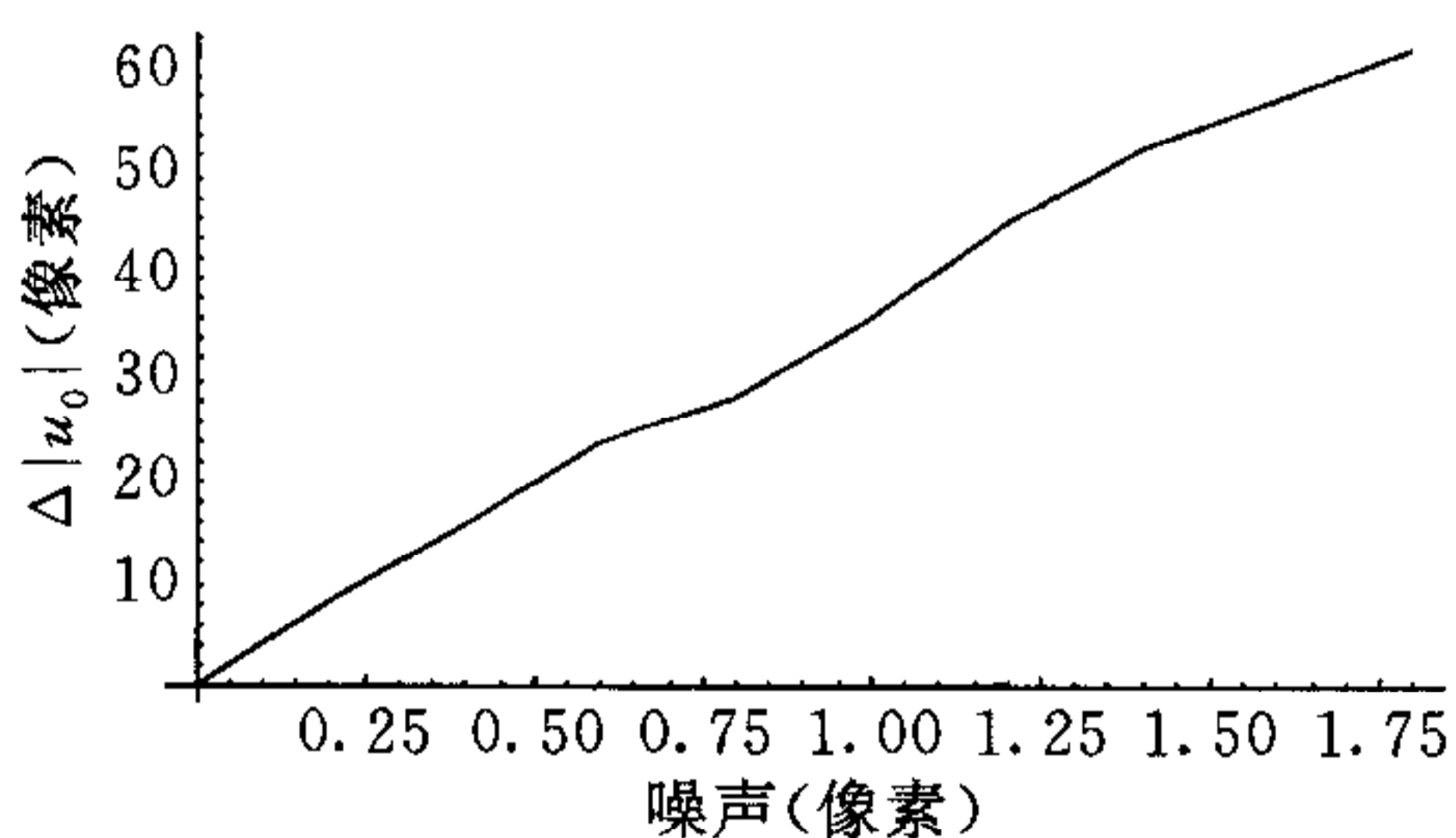
噪声(象素)	f_u	f_v	u_0	v_0	s
0.0	1 000.000 0	1 000.000 0	0.020 0	0.000 0	0.000 0
0.2	999.845 1	999.436 6	-0.532 1	0.334 5	-0.154 2
0.4	999.557 2	1 001.489 6	0.359 9	1.327 7	-2.334 4
0.6	999.432 5	1 002.012 1	0.489 2	2.876 5	3.325 8
0.8	997.092 1	999.435 6	1.347 1	1.754 3	-5.543 2
1.0	994.995 4	1 001.565 4	1.879 5	1.345 7	-9.765 4
1.2	986.658 9	993.547 8	3.009 1	-5.469 2	-11.975 7
1.4	988.379 5	998.569 2	3.337 5	0.572 0	-15.803 5
1.6	985.679 3	1 007.459 1	3.437 9	1.899 2	24.021 1
1.8	980.838 4	989.572 6	3.654 3	-4.751 0	-28.091 0



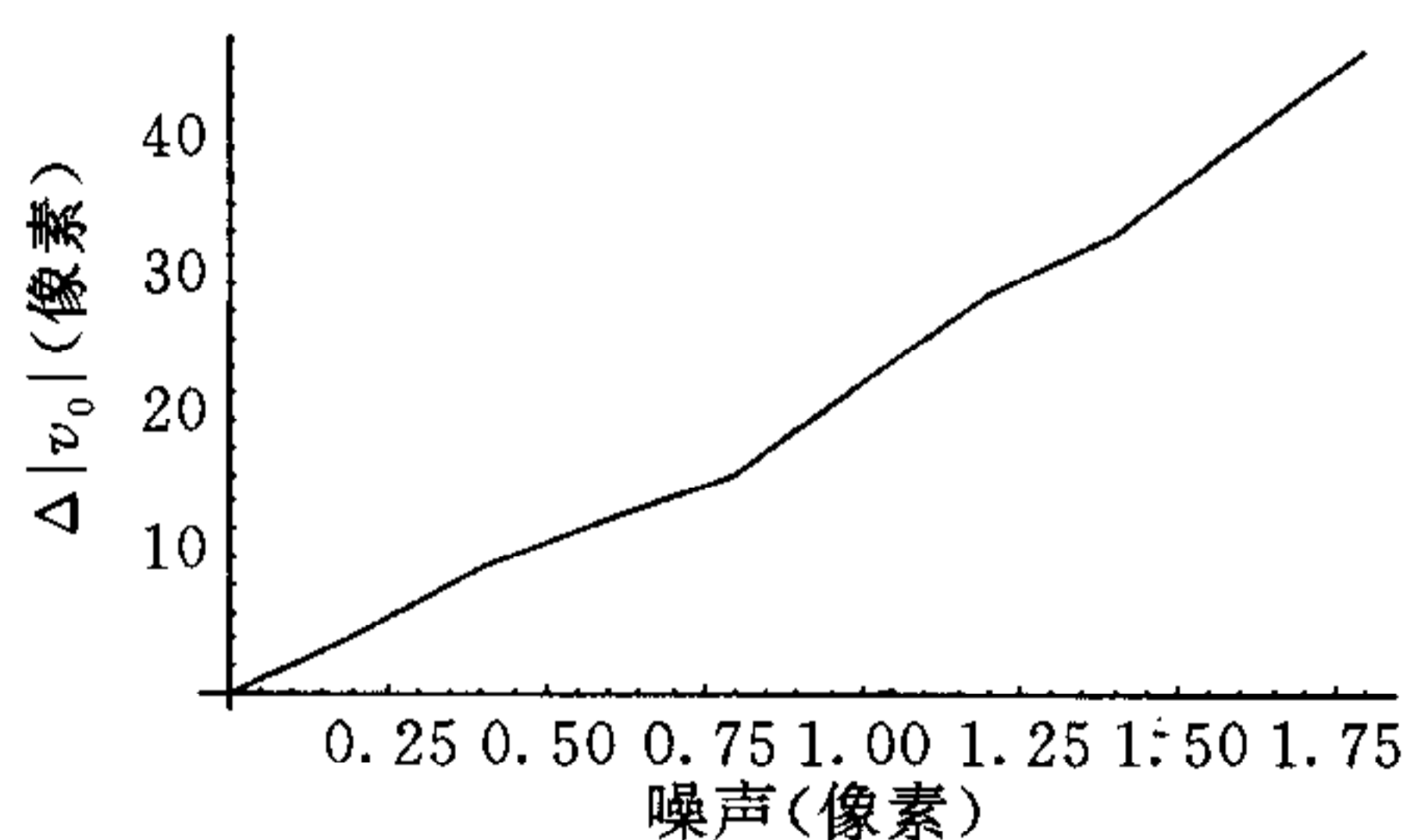
(a) f_u 计算值与理论值之间绝对误差 $\Delta|f_u|$ 的均值随噪声的变化曲线



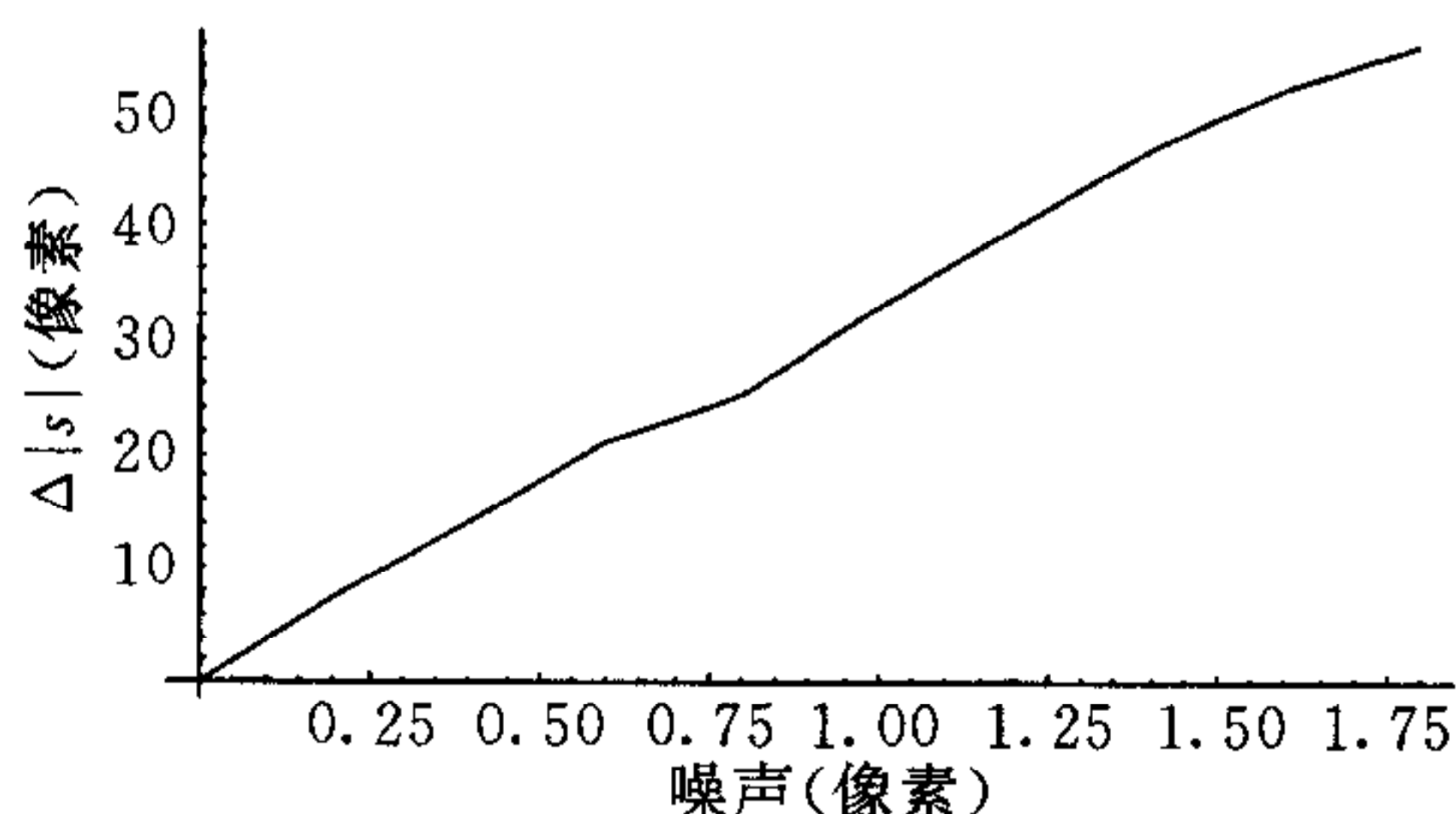
(b) f_v 计算值与理论值之间绝对误差 $\Delta|f_v|$ 的均值随噪声的变化曲线



(c) u_0 计算值与理论值之间绝对误差 $\Delta|u_0|$ 的均值随噪声的变化曲线



(d) v_0 计算值与理论值之间绝对误差 $\Delta|v_0|$ 的均值随噪声的变化曲线



(e) s 计算值与理论值之间绝对误差 $\Delta|s|$ 的均值随噪声的变化曲线

图 3 内参数绝对误差的均值曲线(每种噪声水平下随机试验500次)

4.2 真实图象实验

确定内参数.

在真实图象实验中, 摄像机作一次平移运动和两次一般刚体运动, 构成两组运动, 所摄

取的四幅图象如图 4 所示. 由算法所计算的摄像机内参数为

$f_u = 1\ 794.590\ 0$, $f_v = 1\ 450.170\ 6$, $u_0 = -40.969\ 2$, $v_0 = 71.175\ 2$, $s = -0.000\ 3$.

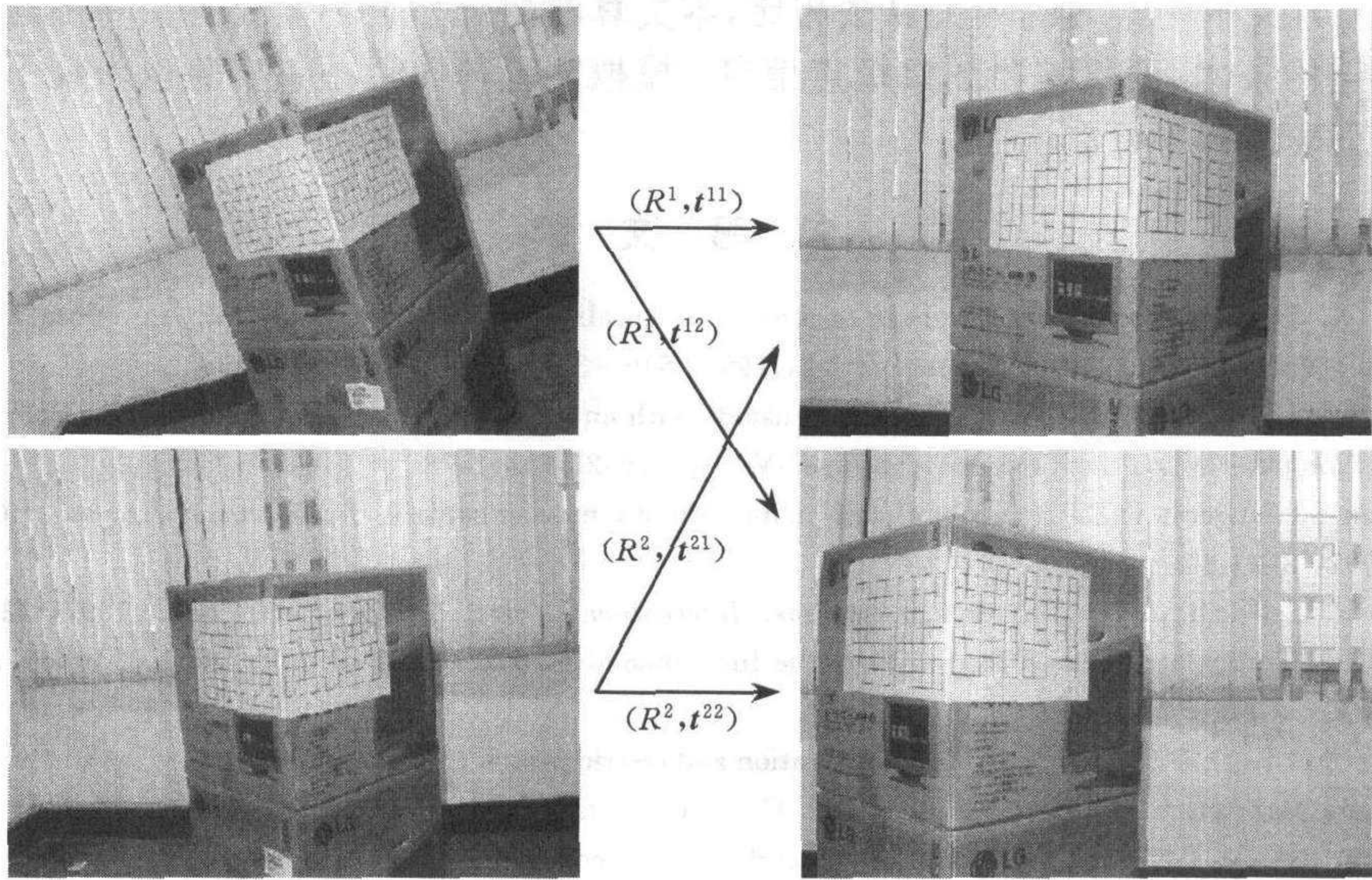


图 4 用于实验的真实图像

运动估计与重构.

为验证所求内参数的合理性,我们选取两幅图象如图 5(a), (b)所示,使用计算的内参数进行运动估计与三维重构实验. 图中的方块顶点是三维重构时使用的图象对应点.

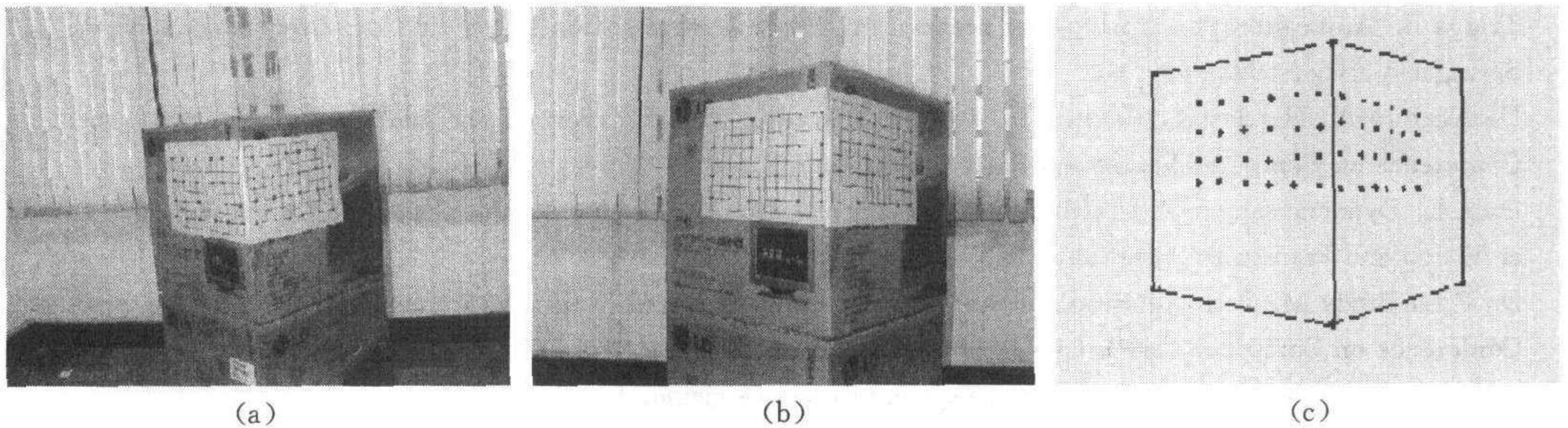


图 5 (a), (b)是用于运动估计和重构的两幅图像, (c)为重构结果

应用文献[1]中的奇异值分解(SVD)方法,所计算的运动参数为平移方向: $(-0.021\ 2, 0.045\ 7, -0.932\ 9)$, 旋转轴: $(0.022\ 7, -0.049\ 0, 0.992\ 5)$, 旋转角: $-6.900\ 6^\circ$. 这与实际情况是大体相符的.

在求得运动参数之后,我们使用立体视觉方法进行三维重构. 重构结果如图 5 所示. 重构出的两个平面的夹角为 $92.543\ 9^\circ$, 与实际情况 90° 非常接近. 真实图象实验表明:本文所给的算法具有一定的实用价值.

5 结束语

本文引入了一种新的关于无穷远平面单应性矩阵的约束方程. 这种新的约束方程将图

象对应点、极点和无穷远平面的单应性矩阵联系在一起. 我们进一步研究探讨了通过这种新约束方程线性求解无穷远平面的单应性矩阵的方法. 在此基础上, 提出了新的线性标定摄像机的算法. 与文献中报导的相关算法相比, 本文算法的优点是不需要有关有限远平面的信息和射影重构技术, 而仅需要图象极点信息. 模拟实验和实际图象实验也验证了本文理论与方法的正确性和可行性.

参 考 文 献

- 1 Hartley R. Estimation of relative camera positions for uncalibrated cameras. In: Proc. European Conference on Computer Vision, NLCS 588, Springer-Verlag, 1992. 579~387
- 2 Faugeras O D. What can be seen in three dimensions with an uncalibrated stereo rig. In: Proc. European Conference on Computer Vision, NLCS 588, Springer-Verlag, 1992. 563~578
- 3 Maybank S, Faugeras O D. A theory of self-calibration of a moving camera. *International Journal of Computer Vision*, 1992, 8(2):123~151
- 4 Hartley R. Self-calibration of stationary cameras. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 22(1):5~23
- 5 Hartley R. Kruppa's equations derived from the fundamental matrix. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1997, 19(2):100~102
- 6 Pollefeys M, Koch R, Van Gool L. Self-calibration and metric reconstruction in spite of varying and unknown internal camera parameters. In: Proc. International Conference on Computer Vision. Bombay; India, 1998. 90~95
- 7 Pollefeys M, Van Gool L, Proesmans M. Euclidean 3D reconstruction from image sequences with variable focal lengths. In: Proc. European Conference on Computer Vision, LNCS1064/5. Springer-Verlag, 1996. 31~42
- 8 Heyden A, Astrom K. Euclidean reconstruction from constant intrinsic parameters. In: Proc. International Conference on Pattern Recognition, Vienna, Austria, 1996. 339~343
- 9 Heyden A. A common framework for multiple view tensors. In: Proc. European Conference on Computer Vision, NLCS 1409, Springer-Verlag, 1998, 1:3~19
- 10 Triggs B. Autocalibration and the absolute quadric. In: Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1997. 609~614
- 11 Triggs B. Autocalibration from planar scenes. In: Proc. European Conference on Computer Vision, NLCS 1409, Springer-Verlag, 1998. 89~105
- 12 De Agapito A, Hartley R, Hayman E. Linear self-calibration of a rotating and zooming camera. In: Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1999. 15~21
- 13 Dron L. Dynamic camera self-calibration from controlled motion sequences. In: Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1993. 501~506
- 14 Du F L, Brady M. Self-calibration of the intrinsic parameters of cameras for active vision systems. In: Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1993. 477~482
- 15 Li M X. Camera calibration of a head-eye system for active vision. In: Proc. European Conference on Computer Vision, LNCS800/801, Springer-Verlag, 1994. 543~554
- 16 Ma S D. A self-calibration technique for active vision systems. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1996, 12(1):114~120
- 17 雷 成, 吴福朝, 胡占义. Kruppa 方程与摄像机自标定. *自动化学报*, 2001, 27(5):621~630
- 18 杨长江, 汪 威, 胡占义. 一种基于主动视觉的摄像机内参数自标定方法. *计算机学报*, 1998, 21(5):428~435
- 19 吴福朝, 李 华, 胡占义. 基于主动视觉系统的摄像机自定标方法研究. *自动化学报*, 2001, 27(6):752~762
- 20 吴福朝, 胡占义. 摄像机自定标的线性理论与算法. *计算机学报*, 2001, 24(11):1121~1135
- 21 Zeller C, Faugeras O D. Camera Self-calibration from Video Sequences: the Kruppa Equation, INRIA Rapport de recherche No. 2793, 1996

吴福朝 教授, 博士生导师. 主要研究方向为三维视觉、主动视觉、模式识别以及特征提取.

胡占义 研究员, 博士生导师, 1985年毕业于北京工业大学自动化系, 1986年12月至1993年2月在比利时列日大学电子工程系读博士, 1993年1月获比利时国家博士学位. 专业为计算机视觉. 主要研究方向为三维视觉、机器人导航、主动视觉、特征提取等.