

基于点特征的位姿测量系统鲁棒性分析

郝颖明^{1,2}, 朱 枫¹, 欧锦军¹, 吴清潇¹, 周 静¹, 付双飞¹

(1. 中国科学院 沈阳自动化研究所, 沈阳 110016; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

(ymhao@sia.cn)

摘 要:从工程应用的角度出发,在 P3P 问题有唯一解的条件下,研究位姿误差对图像坐标检测误差的鲁棒性。通过简化条件下的理论推导并结合一般条件下的仿真实验,证明了由图像坐标检测误差引起的位姿误差随摄像机焦距的增大而减小。与主点坐标无关,随着目标模型中特征点间距离的增大而减小,随着测量距离的增大而增大等结论。这些结论对位姿测量系统的设计具有一定的指导意义。

关键词:位姿测量; 鲁棒性; P3P

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A

Robustness analysis of pose estimation based on points

HAO Ying-ming^{1,2}, ZHU Feng¹, OU Jin-jun¹, WU Qing-xiao¹, ZHOU Jing¹, FU Shuang-fei¹

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang Liaoning 110016, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: From the perspective of practical application, the robustness of pose estimation with coordinate detection error was discussed, given that P3P issue has exclusive solution. With the theoretical derivation on simplified condition and the simulation on normal condition, some conclusions have been obtained such as the pose estimation error is decreases with increment of camera focus ratio, is independent to the coordinate of image center point, decreases with the increment of distance between control points in object model, increases with the increment of estimation distance, etc. All these conclusions are significant to the design of pose estimation system.

Key words: pose estimation; robustness; Perspective-3-Point(P3P)

0 引言

随着科学技术的不断发展,越来越多的应用场合需要确定两个物体间的三维位姿关系。基于点特征的单目视觉测量是三维位姿测量的主要方法之一,该方法通过控制点间位置关系的约束来求解观察目标与摄像机间的相对位置和相对姿态,这是典型的 n 点透视问题(Perspective- n -Point Problem,简称 PnP 问题)^[1]。P3P 问题作为特征点最少的 PnP 问题,已成为 PnP 问题的主要研究方向之一,对其开展研究具有十分重要的理论与应用意义。长期以来,关于 P3P 问题的研究主要集中于如何求解和在什么情况下有多少个解的纯数学问题^[2-3]。由于其解法的时间复杂度高,又存在多解及算法的鲁棒性差等问题,使其应用受到一定的限制。针对实际应用时,三个特征点可以人为选取或布置这一先决条件,周鑫等人研究了特征点与摄像机间位置与 P3P 问题解的唯一性的关系,证明了当三个特征点为等腰三角形,且特征点与摄像机间满足某些约束条件时,P3P 问题具有唯一解^[4]。这一结论已经在实际工程测量中得以应用^[5]。

P3P 问题的另一个重要研究内容是测量精度和鲁棒性,这是单目视觉位姿测量从理论迈向实际应用必须解决的关键问题之一。但目前关于这一问题的研究尚停留在采用多个特征点来进行迭代运算,在迭代过程中运用一些优化策略的鲁

棒估计阶段^[6-7],直接针对 P3P 问题的鲁棒性研究和误差分析尚未发现相关报道。

本文从实际工程应用出发,直接利用文献[4]的研究成果,仅在 P3P 问题有唯一解即三个特征点为等腰三角形的前提下,讨论 P3P 问题的鲁棒性。同时针对大部分实际工程应用只关心最大误差而不关心平均误差的特点,仅分析测量系统的最大误差。在分析过程中,也侧重于寻找测量结果的鲁棒性与测量系统设计参数之间的关系,以便为实际测量系统的设计提供参考。

1 位姿误差与图像坐标检测误差

三维位姿测量指求解两个物体间的三维位姿关系,包括三个平移量(t_x, t_y, t_z)和分别绕三个坐标轴的旋转量($\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$),在实际工程应用中,常采用在一个物体上固定摄像机,在另一个物体上固定由三个控制点组成的观察目标的方式。由于摄像机和观察目标在两个物体上的位置和姿态固定,只要测量出摄像机坐标系与观察目标坐标系间的相对位姿关系,就可以计算出两个物体之间的相对位姿关系。因此,本文仅分析摄像机坐标系与观察目标坐标系间的相对位姿误差。设观察目标上的三个控制点在目标坐标系下的坐标为 $P_{oi} = (x_{oi}, y_{oi}, z_{oi})^T$,在摄像机坐标系下的坐标为 $P_{ci} = (x_{ci}, y_{ci}, z_{ci})^T$,其中 $i = 1, \dots, 3$ 。则有:

收稿日期:2008-01-07;修回日期:2008-03-20。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(60705011)。

作者简介:郝颖明(1966-),女,辽宁沈阳人,副研究员,主要研究方向:图像处理、三维测量; 朱枫(1962-),男,江苏无锡人,研究员,主要研究方向:视觉计算、视觉应用系统; 欧锦军(1975-),男,重庆人,副研究员,主要研究方向:机器视觉、视觉软件; 吴清潇(1978-),男,山东滨州人,博士,主要研究方向:图像处理、机器视觉; 周静(1975-),女,安徽宿州人,博士研究生,主要研究方向:摄像机标定、三维建模; 付双飞(1980-),男,辽宁沈阳人,主要研究方向:视觉软件、视景仿真。

$$P_{ci} = RP_{oi} + T \quad (1)$$

其中: $T = [t_x, t_y, t_z]^T$, R 可分解为绕三个坐标轴的姿态角 (a_x, a_y, a_z) 。因此, 只要求出三个控制点在摄像机坐标系下的坐标, 即可算出摄像机坐标系与目标坐标系间的相对位姿关系^[8]。

设目标模型的三个控制点构成等腰三角形(如图1所示), 目标坐标系的 $X_o Y_o Z_o$ 平面为三角形所在平面, 其坐标原点取在三角形顶点到底边垂线与底边的交点上, 高线为 X_o 轴, 正方向由顶角指向底边, 底边为 Y_o 轴, 正方向从左向右, Z_o 轴满足右手定则。

设三角形的顶点为 P_1 , 底边顶点 P_2, P_3 分别在 Y_o 轴的负方向和正方向, 高为 a , 底边长为 $2b$ 。摄像机坐标系原点为光心, 光轴为 X_c 轴, Y_c 轴与图像坐标系 U 轴平行, Z_c 轴与图像坐标系 V 轴平行, 主点坐标为 u_0, v_0 , 焦距为 f_u, f_v , 三个控制点的图像坐标分别为 (u_i, v_i) , 则有:

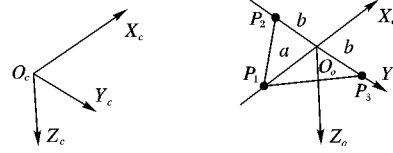


图1 坐标系的定义

$$\begin{cases} (u_1 - u_0)(t_x - a \cos a_z \cos a_y)/f_u = t_y - a \sin a_z \cos a_y \\ (v_1 - v_0)(t_x - a \cos a_z \cos a_y)/f_v = t_z + a \sin a_z \\ (u_2 - u_0)(t_x - b \cos a_z \sin a_y \sin a_x + b \sin a_z \cos a_x)/f_u = t_y - b \sin a_z \sin a_y \sin a_x - b \cos a_z \cos a_x \\ (v_2 - v_0)(t_x - b \cos a_z \sin a_y \sin a_x + b \sin a_z \cos a_x)/f_v = t_z - b \cos a_y \sin a_x \\ (u_3 - u_0)(t_x + b \cos a_z \sin a_y \sin a_x - b \sin a_z \cos a_x)/f_u = t_y + b \sin a_z \sin a_y \sin a_x + b \cos a_z \cos a_x \\ (v_3 - u_0)(t_x + b \cos a_z \sin a_y \sin a_x - b \sin a_z \cos a_x)/f_v = t_z + b \cos a_y \sin a_x \end{cases} \quad (2)$$

式(2)表示了相对位姿 $N = (t_x, t_y, t_z, a_x, a_y, a_z)^T$ 与控制点图像坐标 $I = [u_1, v_1, u_2, v_2, u_3, v_3]^T$ 、目标模型参数 $M_o = [a, b]^T$ 、摄像机内参数 $C_{in} = (u_0, v_0, f_u, f_v)^T$ 三类输入变量间的关系。该方程组共有6个未知数, 6个方程, 可以求解。但由于方程组的非线性, 其解无法写成解析式。为分析位姿量的误差, 将式(2)简记为:

$$F = [F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6]^T = 0 \quad (3)$$

设位姿误差为: $DN = (dt_x, dt_y, dt_z, da_x, da_y, da_z)^T$, 图像坐标误差为: $DI = (du_1, dv_1, du_2, dv_2, du_3, dv_3)^T$ 。当仅考虑图像坐标检测误差时, 对式(3)进行泰勒级数展开并忽略高次项, 则有:

$$DN = - \left[\frac{\partial F}{\partial N} \right]^{-1} \times \frac{\partial F}{\partial I} \times DI \quad (4)$$

式(4)给出了测量位姿的误差 DN 与输入参数误差 DI 之间的关系, 由于 F 是系统参数 C_{in}, M_o , 以及控制点图像坐标 I 和位姿量 N 的函数, 而控制点图像坐标 I 可以通过位姿量 N , 摄像机内参数 C_{in} 和目标模型参数 M_o 来求得, 因此, 位姿量

的误差 DN 除了与图像坐标检测误差 DI 有关外, 还与摄像机内参数 C_{in} 、目标模型参数 M_o 以及位姿量 N 有关。当图像坐标检测误差相同时, 位姿量的误差越大, 则表示位姿量对图像坐标检测误差的鲁棒性越差。

理论上, 只要将式(4)写成解析式就可以直接利用公式分析六个测量位姿量对图像坐标检测误差的鲁棒性。但由于该式写成解析式非常复杂, 无法直接分析位姿量误差的变化规律。为此本文采用简化条件下的理论推导, 辅以一般条件下的仿真实验的方式来分析位姿量的鲁棒性。分析过程中, 位置误差以绝对误差与光轴方向的平移量的相对值来表示, 姿态角误差以绝对误差表示, 记为: $(dt_x/t_x, dt_y/t_x, dt_z/t_x, da_x, da_y, da_z)$, 且仅分析各位姿量的最大误差(以误差绝对值的最大值表示), 记为: $(|dt_x/t_x|_{\max}, |dt_y/t_x|_{\max}, |dt_z/t_x|_{\max}, |da_x|_{\max}, |da_y|_{\max}, |da_z|_{\max})$ 。

2 旋转角为零时的鲁棒性分析

当 $a_x = a_y = a_z = 0$ 时, 有:

$$\begin{cases} \frac{dt_x}{t_x} = \frac{-2bt_y(t_x - a)^2 du_1 + t_x(t_x - a)(at_x + b^2 + bt_y) du_2 - t_x(t_x - a)(at_x + b^2 - bt_y) du_3}{2bf_u[(at_x + b^2)(t_x - a) + at_y^2]} \\ \frac{dt_y}{t_x} = \frac{[2b(b^2 - t_y^2) du_1/t_x] + (b + t_y)[a(t_x - a) + bt_y] du_2 + (b - t_y)[a(t_x - a) - bt_y] du_3}{2bf_u[(a + b^2/t_x)(t_x - a) + at_y^2/t_x]} \\ \frac{dt_z}{t_x} = \frac{[-2bt_y t_z(t_x - a)^2 du_1/t_x] + t_z(t_x - a)(at_x + b^2 + bt_y) du_2 - t_z(t_x - a)(at_x + b^2 - bt_y) du_3}{2bf_u[(at_x + b^2)(t_x - a) + at_y^2]} + \frac{dv_2 + dv_3}{2f_v} \\ da_x = \frac{[2t_z(t_x - a)^2/(t_x du_1)] + t_z[at_y/b - (t_x - a)] du_2 - t_z[at_y/b + (t_x - a)] du_3}{2f_u[(a + b^2/t_x)(t_x - a) + at_y^2/t_x]} + \frac{t_x(dv_3 - dv_2)}{2bf_o} \\ da_y = \frac{-2t_y t_z(t_x - a) du_1 + t_x t_z(at_x + b^2 + bt_y) du_2 - t_x t_z(at_x + b^2 - bt_y) du_3}{2bf_u[(at_x + b^2)(t_x - a) + at_y^2]} + \frac{2(t_x - a) dv_1 - t_x(dv_3 + dv_2)}{2af_v} \\ da_z = \frac{-2bt_x(t_x - a)^2 du_1 + bt_x^2(t_x - a - t_y) du_2 + bt_x^2(t_x - a + t_y) du_3}{2bf_u[(at_x + b^2)(t_x - a) + at_y^2]} \end{cases} \quad (5)$$

从式(3)可以得到:

- 1) 各位姿量的误差与 u_0, v_0 无关, 随着 f_u 的增大而减小。
- 2) $|dt_x/t_x|_{\max}, |dt_y/t_x|_{\max}, |da_z|_{\max}$ 与 f_v, t_z 无关,

$|dt_z/t_x|_{\max}, |da_x|_{\max}, |da_y|_{\max}$ 随着 f_v 的增大而减小。

在实际测量系统中, 一般有 $t_x \gg a, t_x \gg b$, 在该条件下对式(5)进行简化, 有:

$$\begin{cases} |dt_x/t_x| \leq [(2b|t_y du_1|/a) + t_x|du_2| + t_x|du_3|]/(2bf_u) \\ |dt_y/t_x| \leq \{[2b^2 - t_y^2]|du_1|/(at_x)] + |1 + t_y/b||du_2| + |1 - t_y/b||du_3|\}/(2f_u) \\ |dt_z/t_x| \leq [(2b|t_y t_z|)|du_1|/t_x] + a|t_z||du_2 - du_3|/(2abf_u) + (|dv_2 + dv_3|)/(2f_v) \\ |da_x| \leq [|t_z|(2|du_1| + |du_2| + |du_3|)]/(2af_u) + (t_x|dv_3 - dv_2|)/(2bf_v) \\ |da_y| \leq (|t_z||du_2 - du_3|)/(2bf_u) + [2(t_x - a)|dv_1| + t_x|dv_3 + dv_2|]/(2af_v) \\ |da_z| \leq [2(t_x - a)|du_1| + t_x(|du_2 + du_3|)]/(2af_u) \end{cases} \quad (6)$$

根据式(6),可得到在 $t_x \gg a, t_x \gg b$ 时,除了满足上两条规律外,还有:

1) 各位姿量的最大误差随着 t_x 的增大而增大。

2) 平移量的最大误差随 $|t_y|$ 的增大而增大,但只有 $|dt_y/t_x|_{\max}$ 增大的幅度较大,而 $|dt_x/t_x|_{\max}, |dt_z/t_x|_{\max}$ 增大的幅度都较小;姿态角的最大误差几乎与 t_y 无关。

3) $|dt_x/t_x|_{\max}, |da_x|_{\max}, |da_y|_{\max}$ 随着 $|t_z|$ 的增大而增大,但除 $|dt_x/t_x|_{\max}$ 增大的幅度较大外 $|da_x|_{\max}, |da_y|_{\max}$ 增大的幅度都较小, $|dt_x/t_x|_{\max}, |dt_y/t_x|_{\max}, |da_z|_{\max}$ 几乎与 t_z 无关。

4) $|dt_x/t_x|_{\max}, |dt_y/t_x|_{\max}, |dt_z/t_x|_{\max}, |da_x|_{\max}, |da_y|_{\max}$ 随着 a, b 的增大而减小,前四个量主要受 b 的影响,而受 a 的影响较小, $|da_y|_{\max}$ 主要受 a 的影响,而受 b 的影响较小。 $|da_z|_{\max}$ 随着 a 的增大而减小,与 b 几乎无关。

3 一般情况下的统计分析验证

理论分析只能给出在旋转角为零时各位姿量误差的变化规律,而当旋转角不为零时,位姿量误差 DN 的表达式极为复杂,无法根据公式直接分析其变化规律。为此,本文采用仿真实验的方式,在统计意义上进行鲁棒性分析。为验证统计分析结果的正确性,还在相同的条件下利用 P3P 算法进行了直接仿真实验。

仿真实验中,设目标模型为 $M_0 = [300 \text{ mm}, 400 \text{ mm}]^T$,摄像机视场角为 $20^\circ \times 20^\circ$,分辨率为 $512 \text{ 像素} \times 512 \text{ 像素}$,则摄像机内参数 $C_m = [256, 256, 1451, 1451]^T$ 。设旋转角的变化范围为 $\pm 6^\circ$,测量距离 t_x 的变化范围为 $3 \text{ m} \sim 12 \text{ m}$, t_y, t_z 的变化范围为目标满视场,各控制点的图像坐标检测误差相同,都取 ± 0.25 像素。将测量距离均匀分为 10 段,对每个距离段分别统计各位姿量误差绝对值的最大值。

为分析不同系统参数对位姿量鲁棒性的影响,分别针对不同条件进行了以下四组仿真实验:位姿误差与摄像机焦比关系仿真实验分别对焦比为 1451 和 2902 两种情况进行比较;位姿误差与目标模型关系仿真实验分别对: $a = 300 \text{ mm}, b = 400 \text{ mm}, a = 300 \text{ mm}, b = 200 \text{ mm}, a = 150 \text{ mm}, b = 200 \text{ mm}, a = 150 \text{ mm}, b = 400 \text{ mm}$ 四种情况进行比较;位姿误差与 t_y 关系仿真实验,分别对 $t_y = 0, t_y = \text{半视场}, t_y = \text{满视场}$ 三种情况进行比较;位姿误差与 t_z 关系仿真实验,分别对 $t_z = 0, t_z = \text{半视场}, t_z = \text{满视场}$ 三种情况进行比较。

3.1 统计分析实验结果

统计分析仿真实验以式(4)为依据,在更一般的情况下分析各位姿量对图像坐标检测误差的鲁棒性。在前面给定的摄像机内参数 C_m 、目标模型参数 M_0 ,以及图像坐标的检测误差 DI 的前提下,给定任意一组位姿量,根据式(4)可以求出

此时的位姿误差 DN ,在一定的范围内进行大量的数据统计,即可得到位姿误差的变化规律。

仿真实验时,对各控制点的图像坐标检测误差都取最大误差 0.25 像素。而对每个距离段,相对位置和姿态量分别在 t_x 方向变化 3 次, t_y, t_z 方向各变化 5 次,每个姿态角变化 5 次,得到 9375 组位姿数据,分别统计各位姿量的最大误差。

表 1 给出了测量距离为 8 m 时各位姿量误差的统计实验结果,图 2 分别给出了对 $|dt_x/t_x|_{\max}$ 在不同条件下的统计实验结果,其中横坐标为测量距离 t_x ,单位为 m,纵坐标为 $|dt_x/t_x|_{\max}$ 。这些结果表明,位姿量误差 DN 与测量系统的设计参数及相对位姿量的变化规律与上节公式推导得到的结论完全一致。

3.2 P3P 算法验证实验结果

前面的误差分析及仿真实验都是从误差传递公式出发进行的,为验证所得结论的正确性,本节直接利用 P3P 算法在相同条件下进行误差仿真实验。但在图像坐标检测误差的模拟上,采用更接近于实际的量化误差的形式,量化误差的变化范围为 ± 0.25 像素。实验过程为:首先根据系统参数和相对位姿计算出各控制点的理想图像坐标,再对理想图像坐标按 ± 0.25 像素的量化误差范围进行量化,得到实际图像坐标,以实际图像坐标作为输入用文献[8]中的 P3P 算法计算相对位姿,计算位姿与理想位姿的差值即为位姿误差。

由于量化误差的分布规律只有通过大量的仿真数据才能统计出来,直接仿真实验中对每个距离段,分别在 t_x 方向变化 3 次,在 t_y, t_z 方向各变化 9 次,每个姿态角变化 5 次,得到 30375 组位姿数据,同样统计各距离段位姿误差的最大值。仍旧进行焦比变化、目标模型变化、 t_y 变化、 t_z 变化四组实验。实验结果与前面的误差统计分析仿真实验结果基本相同,只是直接仿真实验中图像坐标检测误差为随机值,而误差统计分析仿真实验中图像坐标检测误差都取最大值,使得在误差统计分析仿真实验中虽变化规律明显但变化幅度不大的量在实际仿真实验结果中变化规律不再明显。

表 2 给出了测量距离为 8 m 时各位姿量误差的直接仿真实验结果,比较表 1 和表 2 可以看出,直接仿真实验结果与误差统计分析实验结果的变化规律完全一致,只是变化幅度没有误差统计实验的大。图 3 给出了不同条件下对 $|dt_x/t_x|_{\max}$ 的仿真实验结果,其中横坐标为测量距离 t_x ,单位为 m,纵坐标为 $|dt_x/t_x|_{\max}$ 。比较图 2 和图 3 可以看出, $|dt_x/t_x|_{\max}$ 在实际仿真实验中受 t_y 的影响比较小,变化规律不明显,而在误差统计分析仿真实验中,虽影响也较小,但有明显的变化规律。除此以外,其他变化规律完全一致。这也间接验证了理论分析结果的正确性。

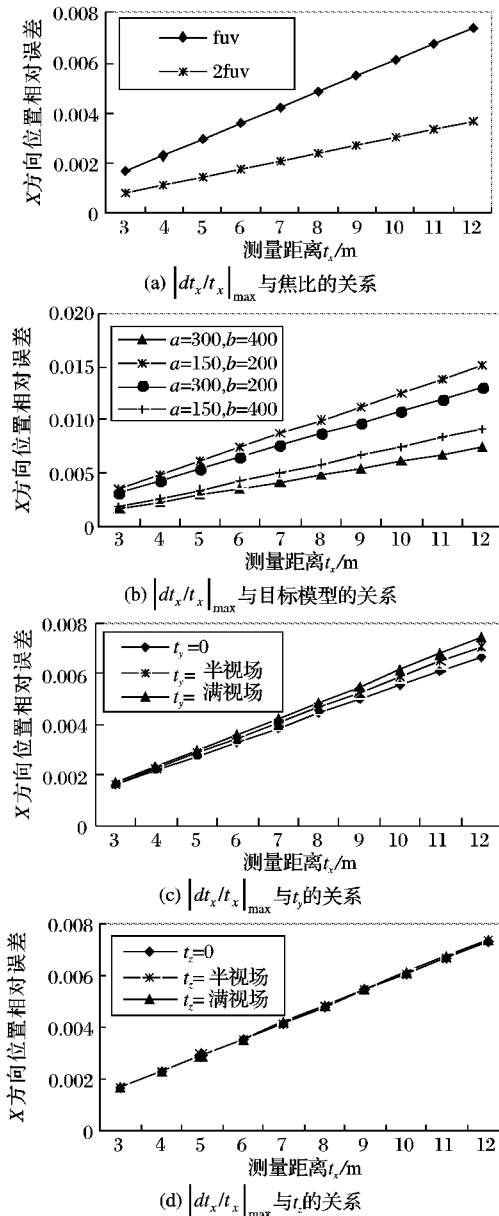
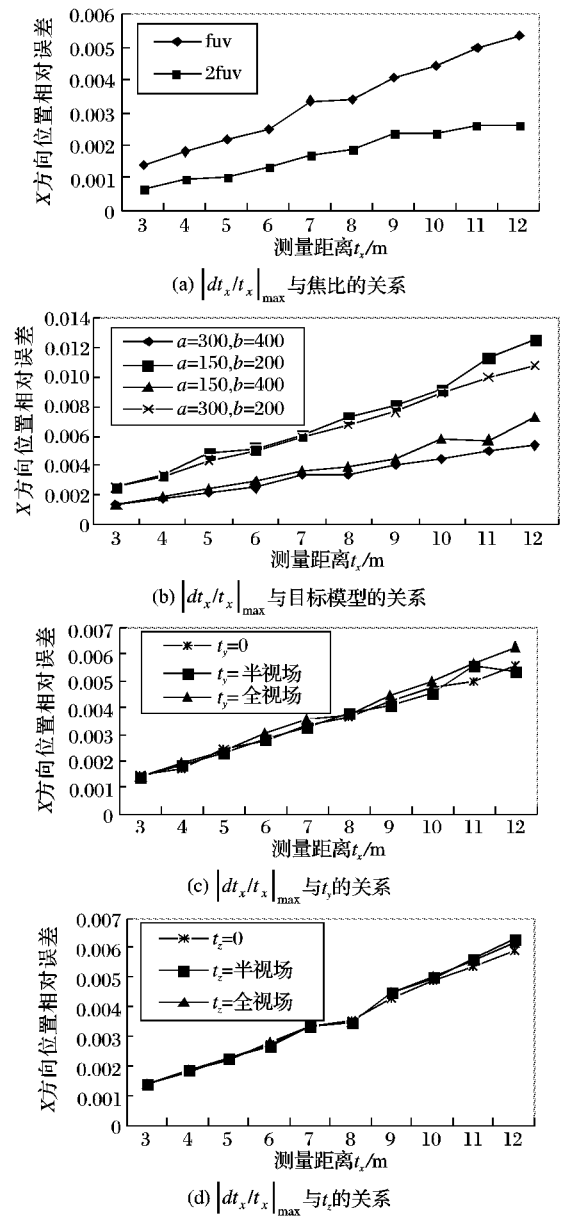
图2 $dt_{x\max}/t_x$ 的统计分析结果图3 $|dt_x/t_x|_{\max}$ 的仿真实验结果

表1 各位姿量误差的统计实验结果

条件	$ dt_x/t_x _{\max}$	$ dt_y/t_x _{\max}$	$ dt_z/t_x _{\max}$	$ da_x _{\max}$	$ da_y _{\max}$	$ da_z _{\max}$
$f_u = f_v = 1451/f_u = f_v = 2902$	1.9996	2.0000	2.0000	2.0001	1.9999	1.9999
$t_x = 8\text{ m}/t_x = 4\text{ m}$	2.1048	2.7000	2.1563	2.2300	2.0670	2.1316
$t_y = \text{满视场}/t_y = \text{半视场}$	1.0429	2.0289	1.0375	1.0096	1.0039	0.9951
$t_z = \text{满视场}/t_z = \text{半视场}$	1.1050	1.0037	1.5736	1.1251	1.0296	1.0003
$a, b = 150, 200/a, b = 300, 400$	2.0616	2.5074	2.1116	2.1222	2.0429	2.0759
$a, b = 150, 400/a, b = 300, 400$	1.2128	1.1981	1.1884	1.2385	1.9372	1.9131
$a, b = 300, 200/a, b = 300, 400$	1.7923	2.1852	1.8246	1.8023	1.1009	1.0437

表2 各位姿量误差的直接仿真实验结果

条件	$ dt_x/t_x _{\max}$	$ dt_y/t_x _{\max}$	$ dt_z/t_x _{\max}$	$ da_x _{\max}$	$ da_y _{\max}$	$ da_z _{\max}$
$f_u = f_v = 1451/f_u = f_v = 2902$	1.8348	2.0529	1.8468	1.9702	1.8546	1.9427
$t_x = 8\text{ m}/t_x = 4\text{ m}$	1.8983	2.1921	1.7684	1.9374	1.9750	2.0659
$t_y = \text{满视场}/t_y = \text{半视场}$	0.9754	1.7418	1.0099	0.9761	0.9678	0.9727
$t_z = \text{满视场}/t_z = \text{半视场}$	1.0084	0.9948	1.4346	1.0864	1.0332	0.9994
$a, b = 150, 200/a, b = 300, 400$	2.1616	2.1160	2.1048	2.1124	1.9836	2.2920
$a, b = 150, 400/a, b = 300, 400$	1.1651	1.1417	1.0699	1.1431	1.9943	2.1299
$a, b = 300, 200/a, b = 300, 400$	1.9764	1.9510	1.8471	2.0546	1.0981	1.1882

体分割成不同的深度部分,然后对每个分割部分各自生成一个阴影图,保证了在整个深度范围内均能生成合适的采样密度,最后利用多个阴影图进行渲染,既增强了场景真实感,又保证了绘制速度,减少了缓存空间,较好地解决了大规模虚拟

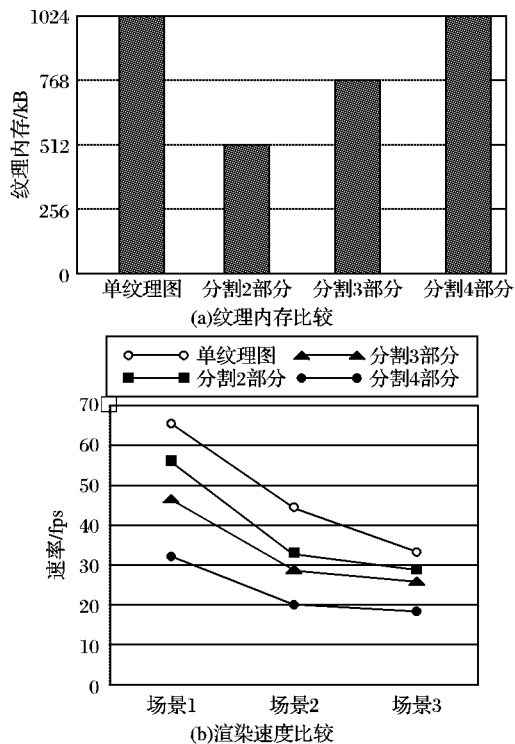


图5 纹理内存和渲染速度比较

环境中实时阴影生成技术问题。

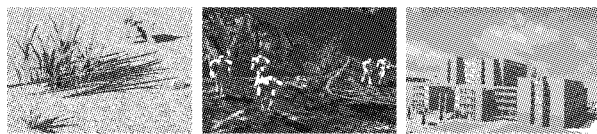


图6 大规模虚拟环境的视觉效果

参考文献:

- [1] 赵乃良, 陈艳军, 潘志庚. 基于数据修正的实时阴影反走样算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(8): 130-135.
- [2] WILLIAMS L. Casting curved shadows on curved surfaces[J]. Computer Graphics, 1978, 12(3): 270-274.
- [3] STEFAN B. Hardware-accelerated rendering of antialiased shadows with shadow maps[J]. Computer Graphics International, 2001, 21(4): 209-214.
- [4] DANIEL S. Robust shadow maps for large environments[C]// Proceedings of SIGGRAPH 2005. Los Angeles: ACM SIGGRAPH, 2005: 385-392.
- [5] STAMMINGER M, DRETTAKIS G. Perspective shadow maps[J]. SIGGRAPH 2002: ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 557-562.
- [6] HASENFRATZ J M, LAPIERRE M, HOLZSCHUCH N, et al. A survey of real-time soft shadows algorithms [J]. Computer Graphics Forum, 2003, 22(4): 753-774.
- [7] MICHAEL W. Light space perspective shadow maps [J]. ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 2004), 2004, 12(3): 92-104.

(上接第 1716 页)

4 结语

本文从实际工程应用出发,分析了当 3 个控制点构成等腰三角形时 P3P 位姿测量方法对图像坐标检测误差的鲁棒性与测量系统参数的关系。通过简化条件下的理论推导、一般条件下的统计分析,辅以直接仿真实验验证,得到在图像坐标检测误差相同的条件下,各位变量的最大误差与摄像机内参数、目标模型以及相对位置具有如下关系:

1) 摄像机的主点坐标 (u_0, v_0) 对各位变量误差无任何影响,焦比 (f_u, f_v) 对各位变量最大误差的影响规律相同,焦比增大时,位变量最大误差减小。

2) 目标模型中控制点间距离越大,各位变量最大误差越小,其中等腰三角形底边的长度对 $|dt_x/t_x|_{\max}$, $|dt_y/t_x|_{\max}$, $|dt_z/t_x|_{\max}$, $|da_x|_{\max}$ 的影响较大,而三角形的高对 $|da_y|_{\max}$, $|da_z|_{\max}$ 的影响较大。

3) 距离方向的平移量 t_x 对各位变量最大误差的影响都很大,各位变量的最大误差都随着 t_x 的增大而减小。

4) 非距离方向的平移量 t_y, t_z 只对该方向平移量的最大误差有较大影响,对其他位变量误差的影响不大, $|dt_y/t_x|_{\max}$, $|dt_z/t_x|_{\max}$ 分别随 $|t_y|$, $|t_z|$ 的增大而增大。

上述结论,为单目视觉位姿测量系统的设计提供了理论依据。在实际测量系统中,可以根据具体项目对测量范围和测量精度的要求,结合测量误差与测量系统参数间的关系,合理设计摄像机参数和目标模型参数。

参考文献:

- [1] FISHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. Communications of the ACM, 1981, 24(6): 381-395.
- [2] HARALIC R M, LEE C, OTTENBERG K, et al. Analysis and solutions of the three point perspective pose estimation problem[M]. Proceeding of the International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1991: 592-598.
- [3] GAO XIAO-SHAN, HOU XIAO-RONG, TANG JIAN-LIANG, et al. Complete solutions classification for the perspective-three-point problem[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(8): 930-943.
- [4] 周鑫, 朱枫. 关于 P3P 问题解的唯一性条件的几点讨论[J]. 计算机学报, 2003, 26(12): 1696-1701.
- [5] 郝颖明, 吴清潇, 周船, 等. 基于单目视觉的水下机器人悬停定位技术与实现[J]. 机器人, 2006, 28(6): 656-661.
- [6] HARALICK R M, JOO H, LEE C N, et al. Pose estimation from corresponding point data[J]. IEEE Transaction on System, Man and Cybernetics, 1989, 19(6): 1426-1445.
- [7] ZHUANG X H, HUANG Y. Robust 3D-3D pose estimation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(8): 818-824.
- [8] 郝颖明, 朱枫, 欧锦军. 目标位姿测量中的三维视觉方法[J]. 中国图象图形学报, 2002, 7(12): 1247-1251.