

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2020.03.010

一种无标定视觉伺服系统的快速跟踪策略

马树军, 金铁铮, 王英蕾, 白昕晖
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 为了提高机械臂跟踪动态目标的跟踪效率,本文提出了一种无标定视觉伺服系统的快速跟踪策略.一方面,该策略通过预测机械臂关节角的方法,使得控制器计算行为与机械臂运动行为同时进行;另一方面,该策略使用最新的图像信息计算关节角,提高了系统的实时性.在仿真实验和实物实验中,构建了应用不同跟踪策略的两个无标定视觉伺服系统以跟踪动态目标.最后,通过对比两系统的跟踪时间和跟踪路径,验证了新跟踪策略的快速性、实时性和抗干扰性.

关 键 词: 视觉伺服;快速跟踪策略;机械臂;雅克比矩阵;跟踪效率

中图分类号: TP 241.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2020)03-0355-06

A Fast Tracking Strategy for Uncalibrated Visual Servo System

MA Shu-jun, JIN Tie-zheng, WANG Ying-lei, BAI Xin-hui
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: MA Shu-jun, E-mail: mashujun@me.neu.edu.cn)

Abstract: In order to improve the tracking efficiency of manipulator tracking dynamic target, this paper proposed a fast tracking strategy of uncalibrated visual servo systems. On the one hand, by predicting the joint angle of the manipulator motion, the controller's calculating behavior can be carried out in parallel with the manipulator's moving behavior. On the other hand, the strategy uses the latest image information to calculate the joint angle, which improves the real-time performance of the system. In the simulation and physical experiments, two uncalibrated visual servo systems with different tracking strategy algorithms are constructed to track dynamic target. Finally, the fast, real-time and anti-jamming performance of the strategy are verified by comparing tracking time and tracking path.

Key words: visual servo; fast tracking strategy; manipulator; Jacobian matrix; tracking efficiency

视觉伺服利用视觉传感器间接检测目标物体和机械臂的实际位姿或相对位姿,并以此实现机械臂对目标物体的跟踪或定位控制.传统的视觉伺服系统作业前需要精密的标定以获得机械臂系统和视觉系统参数,如相机标定、手眼标定、机器人标定等.标定过程精密繁琐,在一些特殊情况下几乎不可能完成.相比之下,无标定视觉伺服无需预先进行系统标定,通过对控制律的研究来控制机械臂运动,在控制成本、控制时间、便捷性和性能等方面表现更优良.在自动化、智能化的发展趋势下,无标定视觉伺服无疑拥有更大的发展潜力^[1-3].

视觉跟踪控制涉及领域众多,包括机器人学、图像处理、控制理论、计算机技术等多个领域,一直以来受到各领域学者及工业界的广泛关注.按照跟踪目标是否运动,视觉跟踪可以分为静态目标跟踪和动态目标跟踪两类.其中,静态目标跟踪可以视为速度为零的动态目标跟踪.

Piepmeyer等在无需进行系统标定的情况下,将动态 Broyden 算法和递归最小二乘(RLS)算法应用到伺服控制系统中来跟踪动态目标,并通过仿真验证了系统的有效性^[4];Bonkovic等在无标

定视觉伺服控制系统中应用基于群体的 Broyden (BP)算法跟踪动态目标,通过仿真验证了系统优良的跟踪性能^[5];清华大学 Hao 等在伺服控制系统中分别应用动态 Broyden 算法、RLS 算法、BP 算法^[1]和卡尔曼滤波方法跟踪动态目标,比较不同算法在不同场景下的性能^[6];Music 等在 Hao 等工作的基础上,在伺服控制系统中应用粒子滤波算法对动态目标进行跟踪^[7]. 上述研究者应用不同算法跟踪动态目标时,跟踪策略中未考虑由开始跟踪目标到成功跟踪目标这一过程的时间效率问题.

本文从提高动态目标跟踪的时间效率出发,考虑图像特征提取频率和提取时间对跟踪效率的影响,提出了一种新的跟踪策略.

1 传统跟踪策略与新跟踪策略

雅克比矩阵描述图像特征变化速度与关节角变化速度之间的关系. 计算雅克比矩阵的算法有很多,如动态 Broyden 算法、RLS 算法、BP 算法、卡尔曼滤波法等^[4-6]. 由于传统跟踪策略和新跟踪策略均可以应用不同的算法计算雅克比矩阵,本文在介绍无标定视觉伺服跟踪策略时,以 RLS 算法为例.

图 1 为机械臂与目标相对位置示意图. 如图所示,在传统跟踪策略中,机械臂末端位置 θ_{k+1} 由目标位置 Obj_k 计算而来. 机械臂由 θ_k 运动至 θ_{k+1} ,末端位置接近 Obj_k . 但此时,目标已由 Obj_k 运动到 Obj_{k+1} ,并非停留在 Obj_k 处. 运动后末端位置滞后于目标实际位置. 尽管重复该过程,末端与目标距离越来越小直至成功跟踪,但是仍损失了跟踪的时间效率.

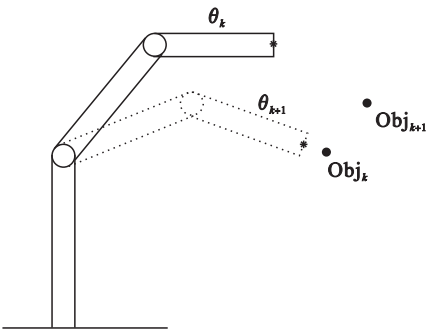


图 1 机械臂与目标相对位置示意图
Fig. 1 Diagram of the relative position of the manipulator and the target

假设以下不等式成立

$$t_{\text{fc}} \leq n \Delta t.$$

(1)

式中: t_{fc} 为进行一次特征提取和计算的时间; Δt 为图像捕捉时间间隔; n 为使式(1)成立的最小正整数.

表 1 为两种跟踪策略的算法流程,其中: θ_k 为第 k 次迭代时的机械臂关节角向量; J_k 为第 k 次迭代时的雅克比矩阵; f_k 为第 k 次迭代时的目标函数; P_k 为遗忘因子比例矩阵; λ 为遗忘因子常数^[4].

表 1 两种无标定视觉伺服跟踪策略流程
Table 1 Two uncalibrated visual servo tracking strategy processes

新跟踪策略	传统跟踪策略
$f: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^m; \theta_0, \theta_1 \in \mathbf{R}^n; J_0 \in \mathbf{R}^{m \times n},$ $P_0 \in \mathbf{R}^{n \times n}, \lambda \in (0, 1);$ for $k = 1, 2, \dots$ 以 $(\theta_{k-1}, \theta_k, J_{k-1}, P_{k-1}, \lambda, f_{k-1}, f_k)$ 为输入, RLS 计算得 $\theta_{k+1}, J_k, P_k;$ if $(\ \theta_{k+1} - \theta_k\ > 2n\theta_{\Delta t})$ { $\theta_{k+1} = \theta_k + n\theta_{\Delta t};$ 机械臂: 运动至 $\theta_k + 2n\theta_{\Delta t};$ } else 机械臂: 运动至 $\theta_{k+1};$ endif endfor	
	机械臂: 运动至 $\theta_{k+1};$ endfor

定义机械臂 1 个图像捕捉间隙 Δt 所走的关节角向量 $\theta_{\Delta t}$, 如式(2)所示. 其中, ω_{max} 为关节运动速度; $\theta_{k+1} - \theta_k = [\Delta q_1, \dots, \Delta q_n]^T$; $\theta_{k+1} - \theta_k$ 所有元素中绝对值最大的元素为 Δq_{max} .

$$\theta_{\Delta t} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta q_1}{|\Delta q_{\text{max}}|} \omega_{\text{max}} \Delta t \\ \vdots \\ \frac{\Delta q_n}{|\Delta q_{\text{max}}|} \omega_{\text{max}} \Delta t \end{bmatrix}.$$

(2)

为提高跟踪效率,一方面,新跟踪策略控制机械臂不停歇地以 ω_{max} 运动,以保证机械臂的跟踪速度;另一方面,控制系统使用尽可能新的图像计算关节角,以提高系统的实时性.

为了最大限度使用实时图像信息,每获取 n 张图像进行一次特征提取和计算. 系统特征提取和计算用时 t_{fc} , 机械臂运动 $n\theta_{\Delta t}$ 用时 $n\Delta t$. 由于控制器根据特征提取和计算结果控制机械臂运动,故 $n\Delta t$ 时间内,无法完成上述两行为. 若每获取 $2n$ 张图像进行一次特征提取和计算,以下方法可完成任务. 一方面,若计算结果 θ_{k+1} 距离 θ_k 过远,等比例缩小 $\theta_{k+1} - \theta_k$ 的数值,以提高特征识别和

计算的频率;另一方面,在计算结果 θ_{k+1} 的基础上,预测 $n\theta_{\Delta t}$ 的关节角,由于 $\theta_{k+1} + n\theta_{\Delta t}$ 不依赖于下一次的特征提取与计算结果,所以,机械臂由 θ_{k+1} 运动至 $\theta_{k+1} + n\theta_{\Delta t}$ 的过程可与下一次的特征提取与计算行为同时进行。

2 仿真实验结果

2.1 仿真实验介绍

如图 2 所示,使用 Machine Vision Toolbox^[8] 和 Robotics Toolbox^[9] 建立 ABB IRB1200 机械臂模型和 CentralCamera 相机模型,并在 Matlab 软件中编写不同策略控制程序,基于此建立仿真环境.其中:机械臂模型的 D-H 参数如表 2 所示;相机配置为 $1\,024 \times 1\,024$ 像素,焦距 8 mm,像素尺寸 $10\,\mu\text{m}$;使用 RLS 算法计算关节角; ω_{\max} 设置为 $16.5\, (^{\circ})/\text{s}$;相机图像捕捉速度 30 帧/s,即 Δt 为 $1/30\,\text{s}$;特征提取时间为 $25\,\text{ms}$,计算时间 $3.3\,\text{ms}$,即 t_{fc} 等于 $28.3\,\text{ms}$ 。

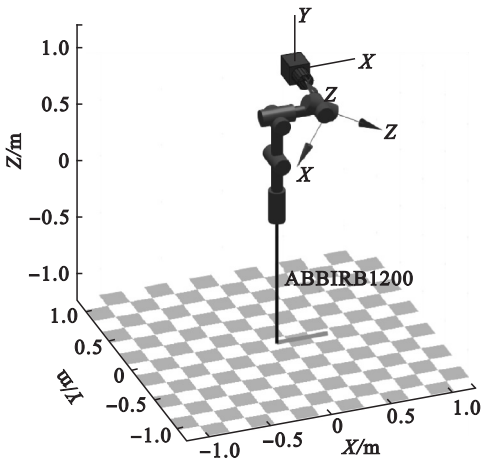


图 2 机械臂模型和相机模型

Fig. 2 Manipulator model and camera model

根据传统跟踪策略和快速跟踪策略构建两个无标定视觉伺服系统,控制机械臂的第二、第三关节在世界坐标系的 XOZ 平面追踪目标物体.目标物体分别沿式(3)描述的直线运动和式(4)描述的圆形运动.为了模拟现实情况,在仿真实验中,为观测数据添加均值为 0、方差为 1 的高斯白噪声。

表 2 ABB IRB1200 D-H 参数表
Table 2 ABB IRB1200 D-H parameter table

连杆	$\theta/(^{\circ})$	d/m	a/m	$\alpha/(^{\circ})$
1	θ_1	0.399 1	0	-90
2	$\theta_2 + 90$	0	-0.35	0
3	θ_3	0	-0.042	90
4	θ_4	0.351	0	-90
5	θ_5	0	0	90
6	θ_6	0.082	0	0

注: θ 为关节角; d 为连杆偏距; a 为连杆长度; α 为连杆扭转角。

$$\left. \begin{aligned} x &= 0.01t + 0.3, \\ y &= 0, \\ z &= -0.5x + 0.7; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} x &= 0.14\sin\left(\frac{\pi}{8}t\right) + 0.4, \\ y &= 0, \\ z &= 0.14\cos\left(\frac{\pi}{8}t\right) + 0.7. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

2.2 仿真实验结果

图 3a 和图 3b 分别表示目标沿式(3)和式(4)描述的曲线运动时,观测噪声方差 $\sigma^2 = 1$ 条件下,不同策略的跟踪轨迹.图 3a 中,目标由图左上角向右下角方向运动;图 3b 中,目标沿图中顺时针方向运动。

传统策略轨迹和新策略轨迹由起始点到第一个拐点之间的轨迹重合.该轨迹表示机械臂由 θ_0 运动到 θ_1 的末端轨迹. θ_0, θ_1 为 RLS 算法计算的初始关节角,由于两种策略初始关节角相同,

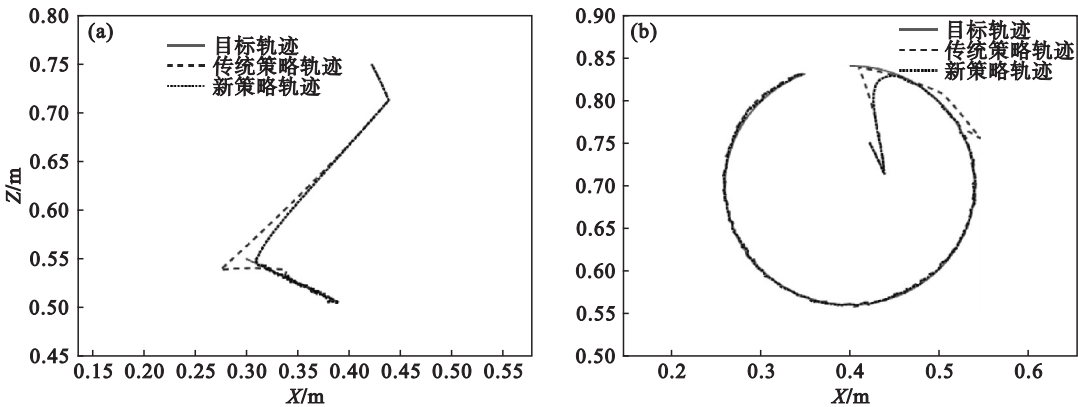


图 3 不同策略跟踪轨迹图

Fig. 3 Tracking trajectories of different strategies

(a)— $\sigma^2 = 1$, 目标沿直线运动; (b)— $\sigma^2 = 1$, 目标沿圆形运动。

所以此段轨迹重合.

由图 3 可知,新策略的轨迹比传统策略的轨迹短;新策略的轨迹方向不停向目标运动方向缓慢变化,传统策略的轨迹方向在拐点处大幅变化,在两拐点之间轨迹方向几乎不变.新策略轨迹不停向目标运动方向运动,证明新策略相比于传统策略有更好的实时性.

相比于新策略,传统策略的跟踪轨迹在目标轨迹附近有明显波动,新策略的跟踪轨迹接近目标轨迹后与目标轨迹近似重合,无明显波动.通过估计得到的初始雅克比矩阵^[10]并不精确,而不同的算法每次计算都会修正雅克比矩阵.因此,随着计算次数的增加,雅克比矩阵越来越精确,计算出的关节角对应的末端位置与目标位置的误差越来越小.传统策略在每个轨迹拐点处计算一次雅克比矩阵和关节角;新策略最大移动 $2\theta_{\Delta}$ 便进行一

次计算,雅克比矩阵不精确带来的误差只作用在新策略跟踪轨迹的起始几步的一小段距离,影响极小,在轨迹图上无法分辨.传统策略初始移动距离长,受雅克比矩阵估计误差影响大,初始移动时机械臂末端超出相机视野范围风险大.

传统策略轨迹与目标轨迹近似重合后,传统策略轨迹和新策略轨迹之间无显著差别.这是因为此时机械臂末端与目标非常接近,机械臂每次移动的关节角较小.而当 $|\theta_{k+1} - \theta_k| \leq 2n\theta_{\Delta}$ 时,新策略与传统策略相同,所以此部分轨迹无显著差别.

图 4a 和图 4b 分别表示目标沿式 (3) 和式 (4) 描述的曲线运动时,观测噪声方差 $\sigma^2 = 1$ 条件下,不同策略下机械臂末端和目标之间的距离-时间曲线.

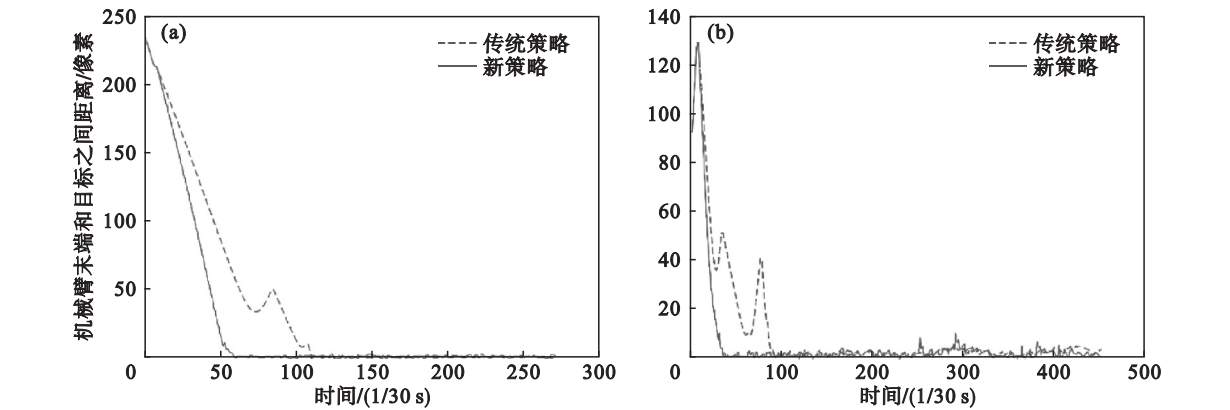


图 4 不同跟踪策略机械臂末端和目标之间距离-时间曲线

Fig. 4 Distance-time curves between the end and target of a manipulator with different tracking strategies
(a)— $\sigma^2 = 1$, 目标沿直线运动; (b)— $\sigma^2 = 1$, 目标沿圆形运动.

图 4 中,初始时,新策略与传统策略曲线完全重合;随后,新策略曲线用更短的时间收敛;传统策略曲线经过几次波动后达到收敛位置.两策略曲线均收敛后,两曲线变化规律相似.

设某时刻机械臂末端和目标在像素平面上的坐标分别为 $(u_{\text{end}}, v_{\text{end}})$, $(u_{\text{obj}}, v_{\text{obj}})$, 机械臂末端和目标之间距离 d 为

$$d = \sqrt{(u_{\text{end}} - u_{\text{obj}})^2 + (v_{\text{end}} - v_{\text{obj}})^2}. \quad (5)$$

表 3 记录了机械臂末端与目标之间距离由起始到第一次小于一个像素的时间,记为收敛时间.每种情况重复 10 次实验并取平均值,记录收敛时间.由表 3 可得,相比于传统策略,当系统应用新策略且目标沿着式 (3) 所描述的直线运动时,收敛效率提升了约 46%;跟踪沿式 (4) 圆形运动的目标时,收敛效率提升了约 60%.证明了新策略收敛的快速性.

表 3 收敛时间统计表			
Table 3 Statistical table of convergence time			
目标轨迹及策略	t/s		
	$\sigma^2 = 0$	$\sigma^2 = 0.5$	$\sigma^2 = 1$
直线,传统策略	3.80	3.89	3.96
直线,新策略	2.03	2.09	2.08
圆形,传统策略	3.13	3.13	3.27
圆形,新策略	1.10	1.28	1.23

3 实物实验结果

3.1 实验条件

实验设备主要包括 ABB 机械臂、台式电脑和 Kinect v1 相机,如图 5 所示.其中:ABB 机械臂型号为 IRB 1200,D-H 参数见表 2;台式电脑 CPU 型号为 AMD 速龙 200GE,运行内存 8 GB;相机的

图像捕捉频率为 30 帧/s,分辨率为 640 × 480.

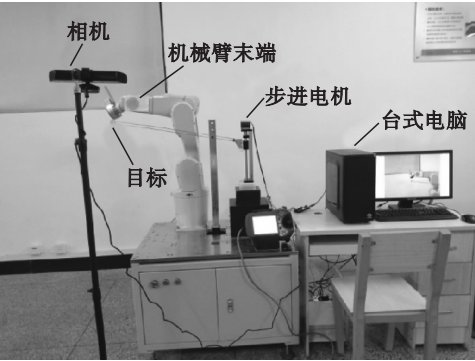


图 5 实验设备
Fig. 5 Experimental equipment setup

机械臂初始关节角向量 θ_0 为 $[0, -5\pi/180]^\text{T}$, θ_1 为 $[\pi/90, -2\pi/45]^\text{T}$, 单位为 rad; 最大关节角速度 ω_{\max} 设置为 21 (°)/s; 初始雅克比矩阵为

$$J_0 = \begin{bmatrix} -240 & -80 \\ 170 & 180 \end{bmatrix}.$$

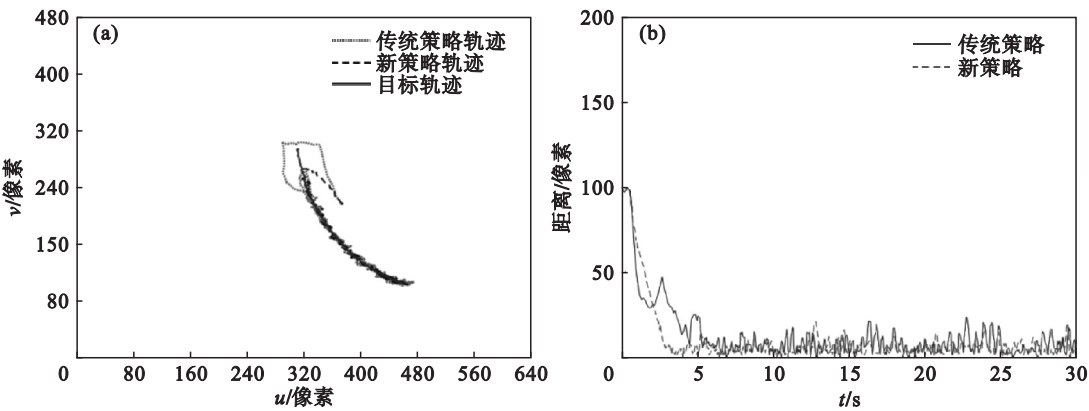


图 6 不同跟踪策略跟踪轨迹图及对应距离 - 时间曲线
Fig. 6 Tracking trajectories and the corresponding distance-time curves for different strategies
(a)—机械臂 - 目标轨迹; (b)—距离 - 时间曲线.

4 结 语

本文提出一种新的无标定视觉伺服跟踪策略. 一方面,系统通过预测机械臂关节角,使控制器行为与机械臂运动并行进行;另一方面,系统使用更实时的图像信息计算关节角. 在仿真和实物实验中,通过对比跟踪时间、跟踪路径,验证了新策略的快速性、实时性和对初始雅克比矩阵误差的抗干扰性.

参考文献:

[1] Gong Z, Tao B, Yang H, et al. An uncalibrated visual servo method based on projective homography [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2018, 15(2): 806 - 817.

[2] 梁新武. 机械手无标定动态视觉伺服研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2011.
(Liang Xin-wu. Research on uncalibrated dynamic visual servo of robot [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.)

[3] 陶波, 龚泽宇, 丁汉. 机器人无标定视觉伺服控制研究进展 [J]. 力学学报, 2016, 48(4): 767 - 783.
(Tao Bo, Gong Ze-yu, Ding Han. Research progress of uncalibrated visual servo control for robots [J]. Journal of Mechanics, 2016, 48(4): 767 - 783.)

[4] Armstrong P J, McMurray G V, Lipkin H. A dynamic Jacobian estimation method for uncalibrated visual servoing [C]//IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Atlanta, 1999.

[5] Bonkovic M, Ales H, Jezernik K. Population-based uncalibrated visual servoing [J]. IEEE/ASME Transactions

on *Mechatronics*,2008,13(3):393–397.

[6] Hao M, Sun Z A. Universal state-space approach to uncalibrated model-free visual servoing [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*,2012,17(5):833–846.

[7] Musić J, Bonković M, Cecis M. Comparison of uncalibrated model-free visual servoing methods [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*,2014,11(1):1–16.

[8] Corke P I. The machine vision toolbox;a MATLAB toolbox for vision and vision-based control [J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*,2005,12(4):16–25.

[9] Corke P I. A robotics toolbox for MATLAB [J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*,1996,3(1):24–32.

[10] 周丽,郭振民. 试探性运动在无标定视觉伺服系统中的应用 [J]. 哈尔滨理工大学学报,2002,7(1):11–17.
(Zhou Li,Guo Zhen-min. Application of exploratory motion in uncalibrated visual servo system [J]. *Journal of Harbin University of Technology*,2002,7(1):11–17.)

(上接第 320 页)

适应的直方图修改方法,能够在信息嵌入时避免过多修改带来模型失真,更适用于低嵌入量的情况. 对比来说,文献[12]的算法能满足更大的嵌入率要求.

表 3 本文算法与文献[12]中算法的性能比较
Table 3 Performance comparison between the proposed algorithm and the one in reference[12]

网格 模型	文献[12]		本文	
	ER/bpv	SNR/dB	ER/bpv	SNR/dB
Bunny	0.28	55.65	0.38	58.91
Horse	0.42	56.60	0.47	58.31
Armadillo	0.14	59.43	0.21	76.67
Hand	0.28	67.20	0.27	67.61
Dragon	0.28	41.50	0.49	59.01

4 结 语

本文提出了一种基于自适应直方图修改的网格可逆信息隐藏算法. 该算法利用网格形状的局部相似性来预测顶点位置,使得构造的预测误差直方图更加陡峭,有利于增加嵌入容量和减少视觉失真. 结合预测误差直方图的分布特点,直接使用嵌入区域内两组指定的预测误差来嵌入秘密信息,无需搜索可用的预测误差,减少了辅助信息对可用嵌入容量的占用. 另外,根据载荷大小自适应动态选取合适的嵌入区域,有效避免对预测误差的过多移动,进一步减少了载密模型的视觉失真. 实验结果表明,本文提出的算法能够在小容量嵌入时保持较高的视觉质量,适用于高保真的网格可逆信息隐藏.

参考文献:

[1] Shi Y Q, Li X, Zhang X, et al. Reversible data hiding;

advances in the past two decades [J]. *IEEE Access*,2016,4:3210–3237.

[2] Choi K,Pun C,Chen C L,et al. Application of a generalized difference expansion based reversible audio data hiding algorithm [J]. *Multimedia Tools and Applications*,2015,74(6):1961–1982.

[3] Zhao J, Li Z. Three-dimensional histogram shifting for reversible data hiding [J]. *Multimedia Systems*,2018,24(1):95–109.

[4] Ni Z,Shi Y Q,Ansari N,et al. Reversible data hiding [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*,2006,16(3):354–362.

[5] Li X,Li B,Yang B,et al. A general framework to histogram-shifting-based reversible data hiding [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*,2013,22(6):2181–2191.

[6] Tsai Y Y,Tsai D S,Liu C L. Reversible data hiding scheme based on neighboring pixel differences [J]. *Digital Signal Processing*,2013,23(3):919–927.

[7] Liu L,Chang C C,Wang A. Reversible data hiding scheme based on histogram shifting of n-bit planes [J]. *Multimedia Tools and Applications*,2016,75(18):11311–11326.

[8] Jhou C Y,Pan J S,Chou D. Reversible data hiding base on histogram shift for 3D vertex [C]//Proceedings of 3rd International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing. Taiwan,2007:365–370.

[9] Chuang C H,Cheng C W,Yen Z Y. Reversible data hiding with affine invariance for 3D models [C]//Proceedings of IET International Conference on Frontier Computing Theory, Technologies and Applications. Taiwan,2010:77–81.

[10] Huang H C,Fang W C,Tsai I T. Reversible data hiding using histogram-based difference expansion [C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Taiwan,2009:1661–1664.

[11] Wu H T,Dugelay J L. Reversible watermarking of 3D mesh models by prediction-error expansion [C]//Proceedings of IEEE 10th Workshop on Multimedia Signal Processing. Queensland,2008:797–802.

[12] Jiang R,Zhang W,Hou D,et al. Reversible data hiding for 3D mesh models with three-dimensional prediction-error histogram modification [J]. *Multimedia Tools and Applications*,2018,77(5):5263–5280.