

基于嵌入式视觉的子机器人入舱方法

赵鹏^a, 曹志强^a, 徐德^b, 陈旭潮^a

(中国科学院自动化研究所 a. 复杂系统管理与控制国家重点实验室, b. 精密感知与控制中心, 北京 100190)

摘要: 提出一种基于嵌入式视觉的子机器人入舱方法, 用于子母式机器人系统中对子机器人的回收. 子机器人基于自身嵌入式平台捕获和处理入口处的引导标识图像, 根据局部颜色排布特征快速提取出标识中心, 利用最小二乘法拟合水平颜色交界线的成像斜率, 基于成像斜率-视偏角模型判别出子机器人航向与入口平面的法线关系, 从而进行运动决策使二者重合以完成入舱. 该方法无需摄像头标定和航迹测量即可准确入舱, 仿真实验验证了所提出方法的有效性.

关键词: 子母式机器人系统; 入舱; 嵌入式视觉; 水平颜色交界线成像斜率; 视偏角

中图分类号: TP242

文献标志码: A

Embedded vision based docking approach for child robot

ZHAO Peng^a, CAO Zhi-Qiang^a, XU De^b, CHEN Xu-chao^a

(a. State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, b. Research Center of Precision Sensing and Control, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China. Correspondent: ZHAO Peng, E-mail: peng.zhao@ia.ac.cn)

Abstract: An embedded vision based docking approach of child robot is proposed for the child robot recovery in the marsupial robotic system. Based on the embedded vision platform, the child robot captures and processes the image data of identifier set on the entrance of the docking station, and extracts the center of guiding identifier fast according to local color distribution features. Then, the horizontal color boundary line is fitted out with the least square method, involving the corresponding imaging slope. By referring to the model of imaging slope-deviation angle of observation, the child robot judges out the relationship between its heading and the normal vector of the entrance to make them basically overlap to each other and finally finish docking. The proposed approach can achieve the accurate docking without camera calibration and its effectiveness is verified by experiments.

Keywords: marsupial robotic system; docking; embedded vision; imaging slope; deviation angle of observation

0 引言

随着机器人技术的发展和应用领域的不断拓展, 多机器人系统因其突出的并行性、鲁棒性和灵活性被广泛研究^[1-3], 其中以整合运输型机器人的航运能力和小型机器人对特定空间或工种适应能力为主要特点的子母式机器人系统逐渐受到重视^[4-10]. 鉴于子母式机器人对环境优良的适应能力, 国内外研究机构从海-空、地-空、地-地等多角度开展研究工作, 并研发出相应的实验样机.

目前研究最为普遍的是地-地子母式机器人系统^[11-15], 代表性的包括MACS-RACS系统^[10]、用于城镇搜索和救援的Silver Bullet-Bujold系统^[12]、Pioneer

2-AT/Scouts系统^[13]等. 当子机器人需要转移、进行能源补充或在暂时有害的环境中寻求庇护时, 需要进入母机器人回收装置内部, 子机器人回收功能显得十分重要. 然而, 回收时不仅需要控制子机器人的位置, 还要求子机器人抵达入口时其航向姿态和入口平面的法向相对应, 这使得子机器人的回收成为一个关键的难点.

文献[13]设计的室内搜救子母式系统通过远程遥控的方式实现子机器人回收; 在文献[14]中, 子机器人通过数据线将捕获的图像信息传给母机器人以完成对回收引导标识的识别, 然而有线连接方式限制了机器人的活动范围; 文献[15]给出的子机器人回收

收稿日期: 2014-10-17; 修回日期: 2015-01-23.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61273352, 61175111, 60805038, 61233014).

作者简介: 赵鹏(1987-), 男, 博士生, 从事嵌入式视觉伺服的研究; 徐德(1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 从事机器人视觉测量与控制等研究.

方法是利用无线数据传输和第3方PC帮助子机器人识别回收舱的引导标识直接趋近完成回收,最终的航向位姿不可控,局限性较大,另外无线方式回传图像又会占用大量的通讯带宽,实时性难以保证且易受干扰。

本文给出一种子机器人自主入舱方法,子机器人依靠自身嵌入式视觉借助事先置于回收舱入口的引导标识感知自身相对入口的姿态,在接近舱门之前使其航向与入口平面的法线重合,从而准确入舱。该方法无需解算相对位姿,不依赖航迹测算和无线数据传输,适用于运算资源有限的小型机器人。最后通过仿真实验验证了该方法的有效性。

1 基于嵌入式视觉的子机器人系统

子机器人采用紧凑的履带式结构,整体尺寸约为 $17\text{cm} \times 14\text{cm} \times 16\text{cm}$;由于履带平台无确切运动模型,且无富余的空间安装编码器设备,其航向和航速的控制依赖视觉反馈。所采用的低成本嵌入式视觉系统包括CMOS摄像头、摄像头转向舵机和基于ARM9的图像处理单元。子机器人由CMOS摄像头捕获视野场景,图像处理单元运行图像算法,基于STM32的运动控制单元根据图像处理结果作出决策,输出多路控制信号控制摄像头的转向以及履带平台的运动。

设计将引导标识置于母机器人的回收舱入口上方,如图1所示,引导标识由红绿颜色矩形块构成,4个矩形块交错形成了十字形的颜色交界线,其中十字线的竖线垂直平分入口。

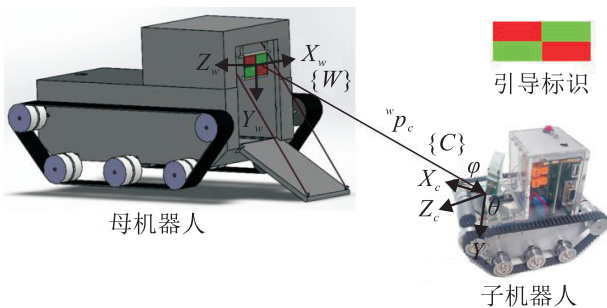


图1 子机器人入舱示意图

2 嵌入式图像处理

引导标识主要根据十字线交点即引导标识中心点周围的颜色排布特征识别,而后由中心点向左右延伸,拟合出水平颜色交界线的成像直线。由于当子机器人摄像头从不同方向采集图像时,两条十字交界线会发生不同程度的倾斜,传统方法需要设计多个方向的检测模板加以识别,然而子机器人能提供给引导标识识别的运算资源极为有限,并不允许反复遍历图像

内存,因此本文首先估算出十字线的倾斜范围,进而针对特征稳定的角度区间设计高效的算法,保证整个识别过程经过一次全局稀疏遍历和极有限的局部完整遍历即可完成。除此以外,还需要尽量避免消耗巨大的颜色空间转算和浮点型除法运算。

2.1 特征不变区间估算

以迪卡尔空间描述法建立世界坐标系 $\{W\}$ 和摄像头坐标系 $\{C\}$,如图1所示。图1中: $\{W\}$ 以引导标识的中心点为原点,以其水平颜色交界线作为 X_w 轴,竖直颜色交界线竖线为 Y_w 轴, Z_w 轴垂直于引导标识所在的平面。

$\{W\}$ 通过一次平移和两次旋转变换可转换为摄像头坐标系 $\{C\}$,转换矩阵为

$${}^cT_w = \begin{bmatrix} {}^wR_c & {}^w p_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1}, \quad (1)$$

$${}^wR_c = \text{Rot}(y, \theta) \text{Rot}(x, \varphi). \quad (2)$$

其中:平移向量 ${}^w p_c = [x_c, y_c, z_c]^T$, y_c 为摄像头相对于引导标识的高度落差,且为正常数; θ 为摄像头相对入口平面的偏转角,简称视偏角; φ 为摄像头的装配倾角,一般不超过 15° ; ${}^c p_w$ 为 $\{W\}$ 的原点在 $\{C\}$ 中的坐标值描述,可通过计算得到

$${}^c p_w = \begin{bmatrix} -x_c \cos \theta + z_c \sin \theta \\ -x_c \sin \theta \sin \varphi - y_c \cos \varphi - z_c \cos \theta \sin \varphi \\ -x_c \sin \theta \cos \varphi + y_c \sin \varphi - z_c \cos \theta \cos \varphi \end{bmatrix}. \quad (3)$$

在基于 $\{C\}$ 描述的空间中的任意一点 ${}^c p_i$,其在图像平面上的成像点坐标 (u_i, v_i) 为

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{c z_i} \begin{bmatrix} k_x & k_{xy} & u_0 \\ & k_y & v_0 \\ & & 1 \end{bmatrix} {}^c P_i. \quad (4)$$

其中: k_x 和 k_y 为成像平面 X 方向和 Y 方向的放大系数, k_{xy} 为两个方向的耦合放大系数, (u_0, v_0) 为摄像头光轴与成像平面的交点。在引导标识水平颜色交界线上任取两点 p_a 和 p_b ,结合式(3)和(4),可得 p_i 在图像平面的成像点坐标 $I_a(u_a, v_b)$, $I_b(u_b, v_b)$,根据两点式可得水平颜色交界线的成像斜率

$$K_h = \frac{k_y \sin \theta}{k_x (\cos \theta \sin \varphi - (z_c / y_c) \cos \varphi) + k_{xy} \sin \theta}. \quad (5)$$

本文采用CMOS摄像头, k_x 和 k_y 值接近且远大于 k_{xy} ;只有在 z_c 为负值时才有可能捕捉到引导标识,同时 φ 值较小, $\cos \varphi$ 的值接近1,摄像头高度落差 y_c 很小,由此可以判断出在子机器人不贴近引导标识时, $|K_h|$ 小于1,即水平颜色交界线的成像直线倾角在 45° 之内。相似地,可以估算出引导标识竖直颜色交

界线的角度在 $81^\circ \sim 99^\circ$ 之间, 所捕获图像中围绕引导标识中心的 4 个角度区间即 $(45^\circ, 81^\circ)$, $(99^\circ, 135^\circ)$, $(-135^\circ, -99^\circ)$ 和 $(-81^\circ, -45^\circ)$ 颜色的排布特征是确定的。

2.2 图像特征提取

根据颜色排布特征不变区间, 设计中心点的识别算法, 取 $(45^\circ + 81^\circ) / 2 = 63^\circ$, 有 $\tan 63^\circ \approx 2$. 从图像右下角分别以 3 个、6 个像素作为行、列的间隔进行稀疏扫描, 每找到一个绿色像素点 (i, j) , 则采用如下方式获取相应的环绕点组: 依次检测像素点 $(i, j - 12)$, $(i + 6, j - 12)$ 和 $(i + 6, j)$ 是否对应红、绿和红色, 若遇到任意一个点不能满足条件, 则将这 4 个点组成的点对剔除; 若皆能满足对应关系, 则将该点对记录为一个环绕点组 G_{ij} ; 紧接着在 (i, j) 邻域完整遍历搜索绿色点, 找到后按上述相同的方式检测颜色排布特征, 并将满足条件的点对加入环绕点组 G_{ij} . 计算最大环绕点组的平均中心坐标, 将其作为引导标识中心点坐标 $I_c(u_c, v_c)$. 将 u_c 归一化为视景方位系数

$$R_c = \frac{2u_c - w}{w}, \quad (6)$$

其中 w 为图像的宽度。

为了适应嵌入式处理的特点, 避免狭隘的颜色阈值标定和依赖浮点型除法, 仅以整型加、乘和比较运算处理初始 RGB 数据. 例如判定某像素点为红色, 利用宽松属性判别式

$$\begin{aligned} ((R) - 1) * 100 > (105 * (G)) \& \\ ((R) - 1) * 100 > (105 * (B)). \end{aligned}$$

结合宽松的颜色属性判断和所述最大环绕点组限定, 以保证识别的鲁棒性和稳定性。

找到 I_c 后, 作为起点以条形长度为 11 算子向两侧逐列扫描, 若算子上下端所扫过的像素点各自满足边界两边的颜色特性, 则将算子的中心点记录为对列的有效交界点. 计算该列各有效点的平均值作为引导标识红绿颜色的一个交界点, 并将该交界点纵坐标作为下列搜索的基准, 逐步获取一系列有效交界点. 若连续 4 列没有找到满足要求的点, 则停止扫描. 最后, 利用最小二乘法处理这些有效交界点, 通过拟合可得引导标识水平颜色交界线的成像直线 L_h 和成像斜率 K_h .

3 基于成像斜率和视景方位的子机器人入舱

3.1 成像斜率-视偏角模型 $K_h-\theta$

综合式 (5) 中水平颜色交界线的成像斜率 K_h 相关参量的限定条件, 可得如下 $K_h-\theta$ 模型:

$$\begin{cases} \cos \theta > 0, 0 < \varphi < 15^\circ, \cos \varphi > 0.96, z_c / y_c < 0; \\ k_{xy} \approx 0, k_x \approx k_y \gg k_{xy}; \\ K_h = \frac{k_y \sin \theta}{k_x (\cos \theta \sin \varphi - (z_c / y_c) \cos \varphi) + k_{xy} \sin \theta}. \end{cases} \quad (7)$$

不难看出成像斜率 K_h 的分母一直大于 0, K_h 的符号取决于摄像头视偏角 θ , 由此可得如下结论。

结论 1 若 $K_h = 0$, 表明摄像头光轴垂直于入口平面, 此时若摄像头转向舵机转角为 0° , 则表示子机器人航向垂直于入口平面; 若摄像头转向舵机转角为 90° , 则表示子机器人航向平行于入口平面。

结论 2 若 $K_h < 0$, 则有 $\theta < 0$, 表明摄像头偏向母机器人左侧; 若 $K_h > 0$, 则有 $\theta > 0$, 表明摄像头偏向母机器人右侧; 若 θ 不为 0, 则 $|K_h|$ 会随着子机器人向入口的趋近而增加, 且距离越近变化越敏感。

3.2 入舱策略

图 2 给出了子机器人入舱的图像伺服控制策略. 子机器人利用 K_h 和 R_c , 依据 $K_h-\theta$ 模型规划入舱路径, 中途借助摄像头转向舵机完成关键点的航向转换, 保证接近舱门之前航向与入口的法线基本重合。

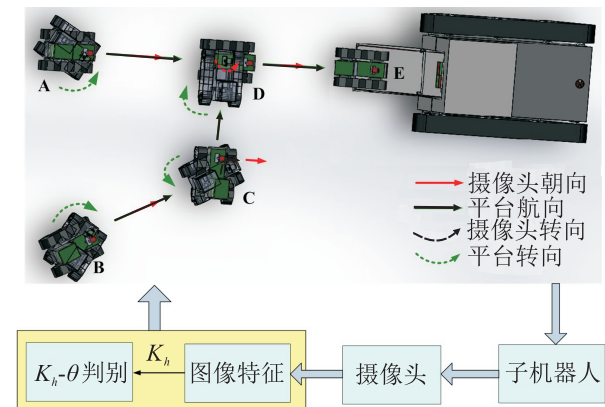


图 2 子机器人入舱的图像伺服控制策略

开始入舱时, 子机器人摄像头光轴朝向与航向一致, 原地旋转使得 R_c 保持在 0 附近, 即对准引导标识, 而后借助 R_c 维持航行方向趋近入口. 在子机器人距离入口较远时, 在图像处理过程中会发现用于拟合 K_h 的颜色交界像素点较少, 导致 K_h 方差值较大; 随着子机器人趋近距离的减短, K_h 波动减小, 且它的值会因出发位置不同表现出如下鲜明的特点。

1) 若子机器人基本上从入口正前方出发, 例如从图 2 中的位置 A 出发抵达 D, 则根据结论 1, K_h 的值稳定在 0 附近, 此时子机器人只需借助 R_c 对准入口, 沿着 $A \rightarrow D \rightarrow E$ 路径即可入舱。

2) 若子机器人是由入口右侧出发的, 例如从图 2 中的位置 B 出发抵达 C, 则根据模型结论 2, K_h 的

值小于0且随着趋近越来越小;此时借助摄像头转向舵机调整航向,使得摄像头垂直于本体且 $K_h \approx 0$,即航向基本与入口平面平行,不过此时 R_c 并不接近0;随后子机器人只需保持平行于入口前进直到 R_c 再次接近于0,这意味着基本抵达入口的正前方,即位置D;随后还原摄像头转角,同时借助图像特征使航向再次对准入口,以实现航向与入口平面法线的基本重合.整体上按照趋近入口→平行入口→入口正前方→重合法线→继续趋近的方式(例如图2中B→C→D→E的路径)入舱.子机器人从入口左侧出发时的运动决策与此相对应,此处不再赘述.

入舱过程中,除了在利用摄像头舵机调整航向的关键阶段,若图像特征波动剧烈,则说明受到了较大的外界干扰,子机器人首先通过伺服对准引导标识,待图像特征稳定后重新按前述入舱策略完成回收.

4 实验

实验1 无干扰子机器人入舱结果如图3所示.

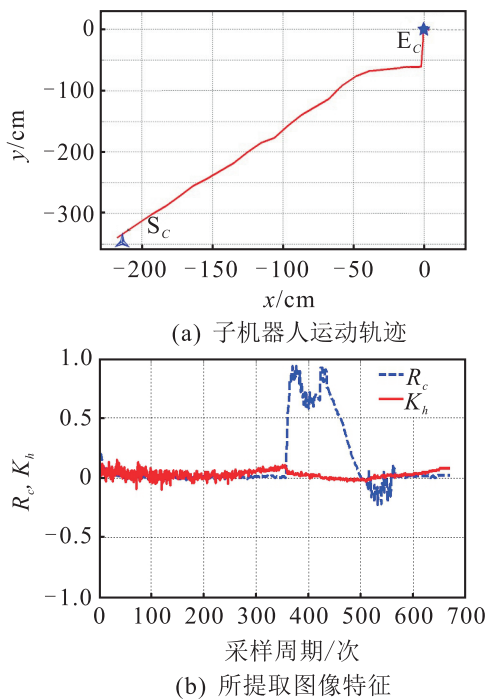


图3 无干扰子机器人入舱实验结果

在图3(a)记录的运动轨迹中,S和E分别为子机器人的起始位置和终止位置.子机器人首先对准回收舱入口向回收舱靠近,然后通过摄像头转向舵机与履带式移动平台进行配合,使子机器人的航向平行于入口平面,进而子机器人运动抵达入口平面的中线,待子机器人的航向和入口平面的法线基本重合后,子机器人前行最终进入回收舱.图3(b)给出了成像斜率 K_h 和视景方位 R_c 的变化曲线.由图3(b)可以看出 K_h 的值在初始阶段震荡较大,随着子机器人

向入口靠近, K_h 的值震荡减小而均值增加,待其增加到一定值,即子机器人入口较近且视偏角较大时,子机器人的航向平行于入口平面,即 K_h 值将向0调整.在此过程中 R_c 发生了较大的变化,随后 R_c 的值不断向0趋近,经历一次波动(由摄像头转向舵机与履带式移动平台相向转动引起)后保持在0附近.

实验2 考虑在机器人运动过程中增加人为的拖拽干扰.子机器人的运动轨迹如图4(a)所示,子机器人由S点出发,向回收舱靠近,当抵达A点时,给予首次干扰,将子机器人拖拽到B点,干扰后子机器人首先对准入口前进了一段距离以稳定航向及图像特征,随后又根据 K_h 的变化特点判断出自身处于入口右侧,因而平行于入口驶向其正前方;在抵达C点后再次施加干扰将其拖拽至D点,子机器人再次识别了干扰后所处的偏向,最终选用合理对策顺利入舱抵达E点.在此过程中成像斜率 K_h 和视景方位 R_c 的变化曲线如图4(b)所示.

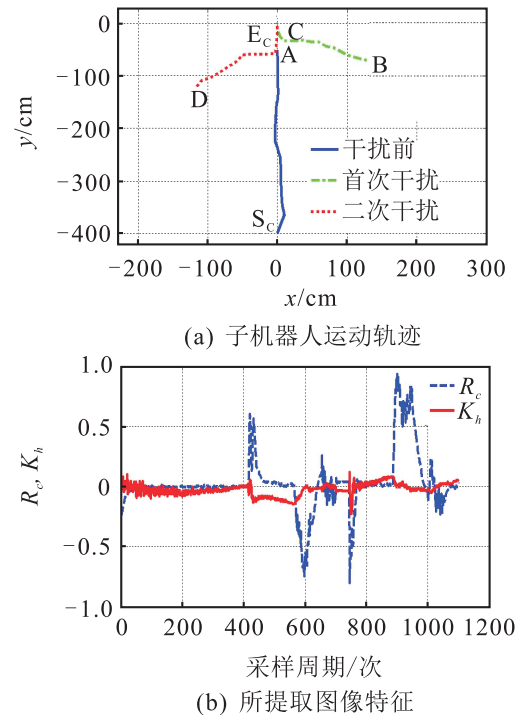


图4 干扰下子机器人入舱实验结果

5 结论

本文提出了一种基于嵌入式视觉的子机器人入舱方法.首先,根据入口引导标识估算图像中的特征不变区域,有针对性地设计识别算法,保证实时性;然后,子机器人根据提取出的引导标识水平颜色交界线在图像平面中的成像斜率及标识中心点位置所蕴含的位姿信息进行入舱伺服.本文所提出方法无需标定摄像头参数可准确入舱,仿真实验结果表明了该方法的有效性.

参考文献 (References)

- [1] 蔡自兴. 多移动机器人协同原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 1-3.
(Cai Z X. Synergy principles and technologies of multi-mobile robots[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2011: 1-3.)
- [2] 李团结, 王飞军. 编队多机器人人类探测方法[J]. 控制与决策, 2008, 23(2): 213-216.
(Li T J, Wang F J. Humanoid exploration method for formation multi-robot systems[J]. Control and Decision, 2008, 23(2): 213-216.)
- [3] 谭民, 王硕, 曹志强. 多机器人系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 1-5.
(Tan M, Wang S, Cao Z Q. Multi-robot systems[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 1-5.)
- [4] Drenner A, Janssen M, Kottas A, et al. Coordination and longevity in multi-robot teams involving miniature robots[J]. J of Intelligent and Robotic Systems, 2013, 72(2): 263-284.
- [5] Lindemuth M, Murphy R R, Steimle E, et al. Sea robot-assisted inspection[J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2011, 18(2): 96-107.
- [6] Hourani H, Wolters P, Hauck E, et al. A marsupial relationship in robotics: A survey[C]. The 4th Int Conf of the Intelligent Robotics and Applications. Heidelberg: Springer, 2011: 335-345.
- [7] Murphy R R, Ausmus M, Magda B, et al. Marsupial-like mobile robot societies[C]. Proc of the Int Conf on Autonomous Agents. New York: ACM, 1999: 364-365.
- [8] Wurm K M, Dornhege C, Eyerich P, et al. Coordinated exploration with marsupial teams of robots using temporal symbolic planning[C]. The 23rd IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE, 2010: 5014-5019.
- [9] Zhou Cao, Cao Zhiqiang, Wang S, et al. A marsupial robotic fish system[C]. The 17th World Congress on Int Federation of Automatic Control. Amsterdam: Elsevier, 2008: 762-766.
- [10] Zhao J, Liu G, Liu Y B, et al. Research on the application of a marsupial robot for coal mine rescue[C]. Int Conf on Intelligent Robotics and Applications. Heidelberg: Springer, 2008: 1127-1136.
- [11] Anderson M O, McKay M D, Richardson B S. Multirobot automated indoor floor characterization team[C]. IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE, 1996: 1750-1753.
- [12] Murphy R R. Marsupial and shape-shifting robots for urban search and rescue[J]. IEEE Intelligent Systems and Their Applications, 2000, 15(2): 14-19.
- [13] Dellaert F, Balch T, Kaess M. The georgia tech yellow jackets: A marsupial team for urban search and rescue[C]. Proc of AAAI Mobile Robot Competition. NW Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2002: 44-49.
- [14] Minten B W, Murphy R R, Hyams J. low-order-complexity vision-based docking[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 2001, 17(6): 922-930.
- [15] Kadioglu E, Papanikolopoulos N. A method for transporting a team of miniature robots[C]. IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE, 2003: 2297-2302.

(责任编辑: 滕 蓉)

关于《最优控制问题的 Legendre 伪谱法求解及其应用》内容的更正

应发表于本刊 2014 年第 29 卷第 12 期第 2113 ~ 2120 页的《最优控制问题的 Legendre 伪谱法求解及其应用》一文的作者的要求, 特对第 2116 页公式 (32) ~ (35) 更正如下:

牛顿法的基本迭代规律为

$$z_{n+1} = z_n - \frac{g(z_n)}{g'(z_n)}. \quad (32)$$

由 Legendre 多项式的微分表达式可知 $g'(z)$ 的解析表达为

$$g'(z) = -N(N+1)P_N(z), \quad (33)$$

同时, Legendre 多项式具有如下性质:

$$(1-z^2)\dot{P}_N(z) = NP_{N-1}(z) - NzP_N(z). \quad (34)$$

由式 (33) 和 (34) 可知

$$\frac{g(z)}{g'(z)} = \frac{NP_{N-1}(z) - NzP_N(z)}{-N(N+1)P_N(z)} = \frac{zP_N(z) - P_{N-1}(z)}{(N+1)P_N(z)}. \quad (35)$$