

# 神经网络 PID 控制的机器人视觉反馈跟踪<sup>①</sup>

白 洁, 王朝立, 孙玉莎, 鲁国辉

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

**摘 要:** 探讨针对视觉空间的非完整移动机器人的跟踪控制问题。在不校准摄像机视觉参数的情况下, 利用视觉反馈得到的信息, 设计出非完整移动机器人轨迹跟踪的神经网络控制器。将 BP 网络与 PID 控制相结合, 避免复杂的公式推导, 解决参数不校准下的控制问题, 并很好的实现跟踪。仿真结果证明了文中方法的有效性。

**关键词:** 移动机器人; 跟踪; 不校准摄像机视觉参数; BP 神经网络; PID 控制; 视觉反馈

## Visual Feedback Tracking of Robots Based on Neural Network PID

BAI Jie, WANG Chao Li, SUN Yu-Sha, LU Guo-Hui

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** This paper discusses the visual servoing tracking problem of nonholonomic mobile robots. The neural network control approach is used to design a tracking controller for nonholonomic mobile robots with uncalibrated visual parameters. Combining BP neural network with PID controller is used to manipulate mobile robots firstly. The complex deduce of common tracking controllers is simplified and tracking control problem with uncalibrated visual parameters is solved. The simulation results show that the method is effective.

**Key words:** mobile robot; tracking; uncalibrated visual parameters; BP Neural Network; PID controller; visual feedback

非完整移动机器人广泛应用于工业、军事、服务等各个领域。早在 1972 年, Nils Nilsson 制造出 Shakey 移动机器人<sup>[1,2]</sup>。1979 年, hill 提出“视觉伺服”(visual servo)概念。但在传统的基于视觉机器人的控制要求摄像头参数标定, 如曹洋设计的鲁棒速度跟踪控制器<sup>[3]</sup>。在视觉参数未知的情况下传统的标定方法代表的方法有 DLT 方法<sup>[4]</sup>, Tsai 的方法<sup>[5,6]</sup>, Weng 的迭代法<sup>[7]</sup>。但这些标定过程费时费力在实际应用中受到限制。张雪波在视觉参数未知的情况下构造了一种自适应视觉控制器, 但控制器设计的过程中数学推导过程繁琐, 控制器结构复杂<sup>[8]</sup>。由于移动机器人本身是非线性系统, 并且视觉参数未知, 这就使传统的方法不能对此复杂的过程进行有效的控制。而此被控对象采用神经网络与传统的控制方法相比效果比较好<sup>[9]</sup>。由于神经网络具有快速并行计算, 学习能力强, 自适应性好, 能够

实现非线性映射等特点。因此选用神经网络 PID 控制。

综上所述, 本文将神经网络 PID 控制方法运用到视觉参数不校准的非完整移动人跟踪问题中, 避免了复杂的公式推导, 解决了视觉参数未知的问题, 并很好的实现了跟踪。仿真结果证明该方法的有效性。

## 1 系统配置

如图 1 所示一个摄像头被固定安装在天花板上, 图像平面与任务平面相互平行但位于两个不同的坐标系内。空间中有 3 个坐标系, 即惯性坐标系  $X-Y-Z$ , 摄像机坐标系  $x-y-z$ , 图像坐标系  $u-O-v$ 。假设摄像机坐标平面与图像坐标平面平行。C 点是摄像机光轴  $X-Y$  平面之间的交点, 其在  $X-Y$  平面坐标系下的坐标为  $(p_x, p_y)$ , 摄像机坐标系的原点在图像坐标系下的坐标为  $(O_{c1}, O_{c2})$ , 移

① 基金项目:国家自然科学基金(60874002);上海市教育委员会重点科技创新项目(09ZZ158);上海市重点学科项目(S30501)

收稿时间:2011-06-21;收到修改稿时间:2011-07-29

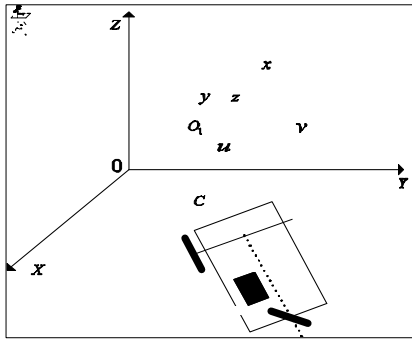


图 1 空间下的非完整移动机器人

动机器人的质心在惯性坐标系下的坐标为  $(x, y)$ 。其中  $x_i, y_i$  是  $x, y$  在图像坐标系下的坐标。模型可得:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 \\ 0 & \alpha_2 \end{bmatrix} R \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} O_{c1} \\ O_{c2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta_0 & \sin \theta_0 \\ -\sin \theta_0 & \cos \theta_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中参数  $\alpha_1, \alpha_2$  分别为两个正常数。  $\theta_0$  为惯性坐标系  $X$  轴正向与图像空间  $y$  轴正向之间的夹角。  $z$  为深度,  $f$  为摄像机的焦距。  $\theta_i$  表示移动机器人行进方向与  $X$  惯性坐标系轴之间的夹角。

### 1.1 问题的说明

非完整约束条件定义为

$$\dot{x} \sin \theta_i - \dot{y} \cos \theta_i = 0 \quad (3)$$

可推导出其在图像坐标系下的运动学模型为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{\theta}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_i \alpha_1 \cos(\theta_i - \theta_0) \\ v_i \alpha_2 \sin(\theta_i - \theta_0) \\ w_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

其离散模型为:

$$\begin{cases} x_i(k+1) = x_i(k) + v_i(k) \alpha_1 T \cos(\theta_i(k) - \theta_0) \\ y_i(k+1) = y_i(k) + v_i(k) \alpha_2 T \sin(\theta_i(k) - \theta_0) \\ \theta_i(k+1) = \theta_i(k) + w_i(k) T \end{cases} \quad (5)$$

其中  $(x_i, y_i, \theta_i), (x_r, y_r, \theta_r)$  分别为移动机器人在图像空间和理想的位姿。  $(v_i, w_i), (v_r, w_r)$  分别为移动机器人实际和理想的线速度和角速度。  $T$  为采样周期。  $k$  为采样时刻。 其第  $k$  时刻跟踪误差:

$$\begin{cases} e_x(k) = x_r(k) - x_i(k) \\ e_y(k) = y_r(k) - y_i(k) \\ e_\theta(k) = \theta_r(k) - \theta_i(k) \end{cases} \quad (6)$$

## 2 基于BP神经网络PID控制器

### 2.1 常见的 BP 网络 PID 控制器模型

BP 网络 PID 控制模型<sup>[10]</sup>如图 2 所示。数字 PID 增量控制算法为:

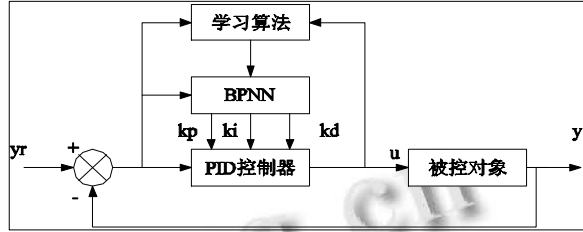


图 2 BP 网络 PID 控制模型

$$\begin{aligned} u(k) &= u(k-1) + k_p [e(k) - e(k-1)] + k_i e(k) + \\ &k_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \\ &\square F [u(k-1), k_p, k_i, k_d, e(k), e(k-1), e(k-2)] \end{aligned} \quad (7)$$

式中  $u(k)$  为 PID 控制器在  $k$  时刻的输出,  $e(k)$  为  $k$  时刻系统期望输出与实际输出的误差, 即:

$$e(k) = y_r(k) - y(k) \quad (8)$$

### 2.2 BP 神经网络模型

BP 网络结构如图 3 所示:

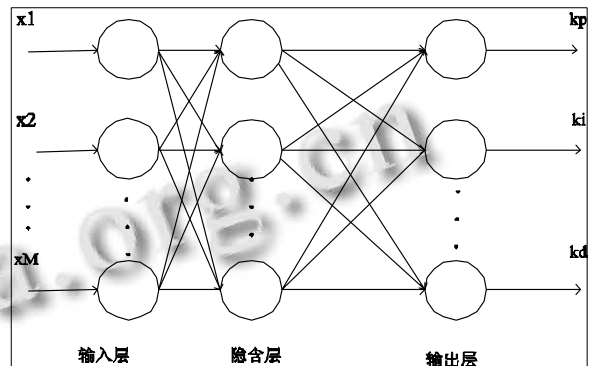


图 3 BP 神经网络模型

此网络是  $M \times Q \times 3$  的三层结构, 网络的输入为:

$$o_j^{(1)}(k) = x_j, j = 1, 2, \dots, M \quad (9)$$

中间隐含层的输入——输出关系为:

$$\begin{cases} net_i^{(2)}(k) = \sum_{j=1}^M w_{ij}^{(2)} o_j^{(1)}(k) - \theta_i^{(2)}, i = 1, 2, \dots, Q \\ o_i^{(2)}(k) = f[net_i^{(2)}(k)] \end{cases} \quad (10)$$

其中  $w_{ij}^{(2)}$  为隐含层权值系数  $\theta_i^{(2)}$  为隐含层阈值  $f(\cdot)$  为隐含层激励函数。此处取正负对称的 S 函数:

$$f(x) = \tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (11)$$

输出层的输入——输出关系为：

$$\begin{cases} net_l^{(3)}(k) = \sum_{i=1}^Q w_{li}^{(3)} o_i^{(2)}(k) - \theta_l^{(3)}, l = 1, 2, 3 \\ o_l^{(3)}(k) = g[net_l^{(3)}(k)] \end{cases} \quad (12)$$

其中  $w_{li}^{(3)}$  为输出层权值系数， $\theta_l^{(3)}$  为输出层阈值， $g[\cdot]$  为输出层激励函数，即：

$$g[x] = \frac{1}{2}[1 + \tanh(x)] \quad (13)$$

式上标角 (1)，(2)，(3) 表示输入层，隐含层，输出层。

神经网络输出：

$$\begin{cases} o_1^{(3)}(k) = k_p \\ o_2^{(3)}(k) = k_i \\ o_3^{(3)}(k) = k_d \end{cases} \quad (14)$$

性能指标函数：

$$E(k) = \frac{1}{2}(y_r(k) - y(k))^2 = \frac{1}{2}e^2(k) \quad (15)$$

网络按照梯度下降法修正权值  $w(k)$ ，并加一个加速收敛的惯性项：

$$\square w_{li}^{(3)}(k) = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{li}^{(3)}} + \alpha \square w_{li}^{(3)}(k-1) \quad (16)$$

其中  $\eta$  是学习速率， $\alpha$  是惯性系数， $\frac{\partial E}{\partial w_{li}^{(3)}}$  为

$$\frac{\partial E}{\partial w_{li}^{(3)}} = \frac{\partial E(k)}{\partial y(k)} \frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} \frac{\partial u(k)}{\partial o_l^{(3)}(k)} \frac{\partial o_l^{(3)}(k)}{\partial net_l^{(3)}(k)} \frac{\partial net_l^{(3)}(k)}{\partial w_{li}^{(3)}(k)} \quad (17)$$

$$\frac{\partial net_l^{(3)}(k)}{\partial w_{li}^{(3)}(k)} = o_i^{(2)}(k) \quad (18)$$

$\frac{\partial y(k)}{\partial u(k)}$  可用符号函数  $\text{sgn}[\frac{\partial y(k)}{\partial u(k)}]$  近似代替。则由

上述的推导得出网络输出层权系数学习算法：

$$\square w_{li}^{(3)} = \alpha \square w_{li}^{(3)}(k-1) + \eta \delta_l^{(3)} o_i^{(2)}(k) \quad (19)$$

$$\delta_l^{(3)} = e(k) \text{sgn}\left(\frac{\partial y(k)}{\partial u(k)}\right) \frac{\partial u(k)}{\partial o_l^{(3)}(k)} g'(net_l^{(3)}(k)), (l = 1, 2, 3) \quad (20)$$

同理可得网络隐含层权系数学习算法：

$$\square w_{ij}^{(2)} = \alpha \square w_{ij}^{(2)}(k-1) + \eta \delta_i^{(2)} o_j^{(1)}(k) \quad (21)$$

$$\delta_i^{(2)} = f'(net_i^{(2)}(k)) \sum_{l=1}^3 \delta_l^{(3)} w_{li}^{(3)}, (i = 1, 2, \dots, Q) \quad (22)$$

式中  $g(\cdot) = g(x)[1 - g(x)] \quad (23)$

$$f'(\cdot) = [1 - f^2(x)] \quad (24)$$

由(6)~(24)式可得

$$\frac{\partial u(k)}{\partial o_1^{(3)}(k)} = e(k) - e(k-1) \quad (25)$$

$$\frac{\partial u(k)}{\partial o_2^{(3)}(k)} = e(k)$$

$$\frac{\partial u(k)}{\partial o_3^{(3)}(k)} = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)$$

### 2.3 基于 BP 神经网络 PID 的机器人控制器

传统的控制器一般采用直接设计移动机器人的角速度和线速度来进行目标跟踪。由于非完整约束关系，导致设计过程比较复杂。本文提出一种新的设计思路，即根据跟踪目标的位姿  $(x_r(k), y_r(k), \theta_r(k))$  与实际位姿  $(x_i(k), y_i(k), \theta_i(k))$  的关系，通过 BP 神经网络 PID，得出保留每步的控制量的  $(u_x(k), u_y(k), u_\theta(k))$ 。每个位姿的被控对象模型为：

$$\begin{cases} x_i(k+1) = u_x(k) + x_i(k) \\ y_i(k+1) = u_y(k) + y_i(k) \\ \theta_i(k+1) = u_\theta(k) + \theta_i(k) \end{cases} \quad (26)$$

再将得到的每步控制量  $u_x(k), u_y(k), u_\theta(k)$ ，代入含有未知参数的移动机器人运动学模型中，通过递推，反解出相应的控制量  $v_i(k), w_i(k)$ 。由于每个位姿都需要跟踪，所以选用了 3 个 BP 神经网络 PID 控制系统对  $x, y, \theta$  分别进行控制，防止干扰。BP 神经网络 PID 非完整移动机器人的控制结构如图 4 所示：具体控制算法如下：

由式(3) (26)可知：

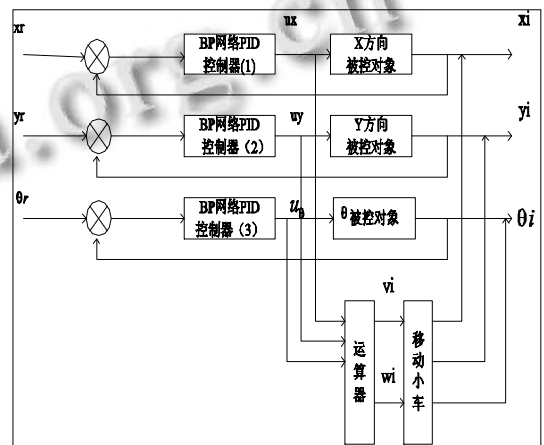


图 4 神经网络 PID 控制器

$$\begin{cases} u_x(k) = v_i(k) \alpha_1 T \cos(\theta_i(k) - \theta_0) \\ u_y(k) = v_i(k) \alpha_2 T \sin(\theta_i(k) - \theta_0) \\ u_\theta(k) = w_i(k) T \end{cases} \quad (27)$$

假定未知  $\theta_0$ ，且未知  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ （对应于 CCD 相机纵横向像素放大倍数相同，有些相机是这么设计）。由式(27)计算可得：

$$\begin{cases} v_i(k)\alpha = u_x(k) \cos(\arctan \frac{u_y(k)}{u_x(k)}) + u_y(k) \sin(\arctan \frac{u_y(k)}{u_x(k)}) \\ w_i(k) = \frac{u_\theta(k)}{T} \end{cases} \quad (28)$$

其中  $\arctan \frac{u_y(k)}{u_x(k)}$  记作  $\varphi(k)$ ，则：

$$v_i(k)\alpha = u_x(k) \cos(\varphi(k)) + u_y(k) \sin(\varphi(k)) \quad (29)$$

$$v_i(k+1)\alpha = u_x(k+1) \cos(\varphi(k+1)) + u_y(k+1) \sin(\varphi(k+1)) \quad (30)$$

式(30)和(29)左右两端相除得：

$$\frac{v_i(k+1)}{v_i(k)} = \frac{u_x(k+1) \cos(\varphi(k+1)) + u_y(k+1) \sin(\varphi(k+1))}{u_x(k) \cos(\varphi(k)) + u_y(k) \sin(\varphi(k))} \quad (31)$$

式 (31)的等式右边都为已知量，由此可递推出

$$\frac{v_i(k+1)}{v_i(1)} = \frac{u_x(k+1) \cos(\varphi(k+1)) + u_y(k+1) \sin(\varphi(k+1))}{u_x(1) \cos(\varphi(1)) + u_y(1) \sin(\varphi(1))} \quad (32)$$

设定移动机器人的第一时刻线速度  $v_i(1)$  的值，即可根据式 (32)得

$$v_i(k+1) = \frac{u_x(k+1) \cos(\varphi(k+1)) + u_y(k+1) \sin(\varphi(k+1))}{u_x(1) \cos(\varphi(1)) + u_y(1) \sin(\varphi(1))} v_i(1) \quad (33)$$

由此可求出每步移动机器人实际需要移动的线速度  $v_i$  和角速度  $w_i$ ，即：

$$\begin{cases} v_i(k) = \frac{u_x(k) \cos(\varphi(k)) + u_y(k) \sin(\varphi(k))}{u_x(1) \cos(\varphi(1)) + u_y(1) \sin(\varphi(1))} v_i(1) \\ w_i(k) = \frac{u_\theta(k)}{T} \end{cases} \quad (34)$$

从而在视觉参数未知的情况下，最终实现了控制移动小车跟踪目标。

### 3 仿真

用上述算法进行仿真，每个 BP 神经网络 PID 控制器都选用  $4 \times 5 \times 3$  的 BP 网络结构。  $v_r = 1.5$ ，  $w_r = 2.3$ ，  $v_i(1) = 0.5$ 。

#### 3.1 神经网络参数选取

3.1.1 设定学习速率  $\eta = 0.25$  不变，改变惯性系数  $\alpha$  当  $\eta = 0.25$ ，  $\alpha = 0.2$  时，跟踪误差曲线见图 5：



图 5  $\eta = 0.25$ ，  $\alpha = 0.2$  误差

当  $\eta = 0.25$ ，  $\alpha = 0.5$  时，跟踪误差曲线见图 6：

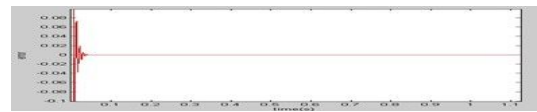


图 6  $\eta = 0.25$ ，  $\alpha = 0.5$  误差

当  $\eta = 0.25$ ，  $\alpha = 0.6$  时，跟踪误差曲线见图 7：

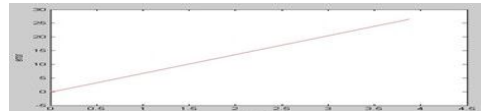


图 7  $\eta = 0.25$ ，  $\alpha = 0.6$  误差

根据仿真结果可以看出，该网络在  $\eta$  不变的情况下，  $\alpha$  在取值小于 0.5 时控制良好，超过 0.5 随着  $\alpha$  的取值增大误差也越大，甚至会出现失控现象。

#### 3.1.2 惯性系数 $\alpha = 0.05$ 不变，改变学习速率 $\eta$

当  $\alpha = 0.05$ ，  $\eta = 0.3$  时，跟踪误差曲线见图 8：

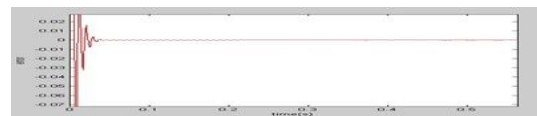


图 8  $\alpha = 0.05$ ，  $\eta = 0.3$  误差

当  $\alpha = 0.05$ ，  $\eta = 0.6$  时，跟踪误差曲线见图 9：



图 9  $\alpha = 0.05$ ，  $\eta = 0.6$  误差

根据仿真结果，该网络在  $\alpha$  不变的情况下，  $\eta$  的取值大小影响不大。所以仿真采用惯性系数  $\alpha = 0.05$ ，学习速率  $\eta = 0.25$ ，可使神经网络满足控制要求。

#### 3.2 对曲线跟踪

目标起始位姿(2, 2, 0)，移动小车起始位姿(0, 0, 0)。跟踪效果见图 10。

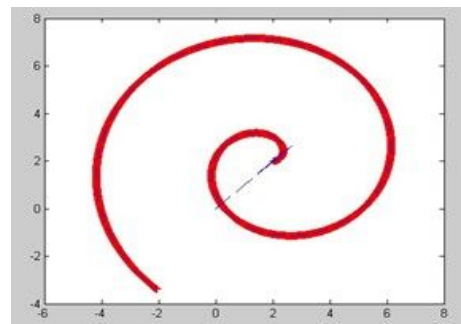


图 10 螺旋曲线跟踪

### 3.3 对直线跟踪

目标起始位姿(2, 1, 2.3)移动小车起始位姿(0, 0, 0), 跟踪效果见图 11。

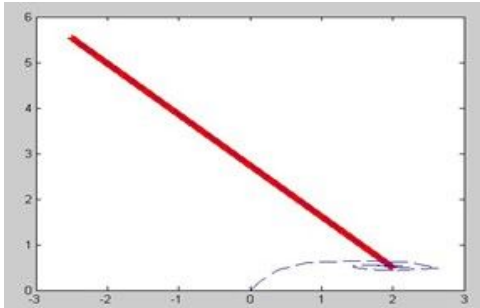


图 11 直线跟踪

## 4 结语

在视觉参数和未知的情况下, 本文提出了一种基于视觉空间位置的 BP 神经网络 PID 控制器, 在视觉空间下对非完整移动机器人实施轨迹跟踪控制。仿真结果表明将神经网络 PID 算法应用到非完整移动机器人的控制中, 不仅有效的解决了 PID 参数的整定问题, 并且不需要视觉参数已知就可以实施有效的跟踪, 同时也省去的繁琐的公式推导过程。

### 参考文献

- 1 Nilsson N. An application of artificial intelligence techniques. *Journal of IJCAI*, 1969,2(3):23-26.
- 2 Giralt G, et al. A multi-level planning and navigation system for a mobile robot:A first approach to HALRE. Proc 6th Int

- Joint Conf, Artificial Intelligent, Tokyo, Japan, 1979, 335-337.
- 3 曹洋,项龙江,徐心和.基于全局视觉的轮式移动机器人轨迹跟踪控制.机器人,2004,26(1):78-82.
- 4 Abdel YI, Aziz KHM. Direct Linear Transformation from ComparatorCoordinates into Object Space Coordinates. In:ASP Symposium on Close-Range Photogrammetry, 1971. 1-18.
- 5 Tsai R, Lenz RK. A Technique for Fully Autonomous and Efficient 3D RoboticsHand/Eye Calibration. *IEEE Trans. Robotics and Automation*,1989,5(3):345-358.
- 6 Giralt G, et al. A multi-level planning and navigation system for a mobile robot:A first approach to HALRE. Proc 6<sup>th</sup> Int Joint Conf, Artificial Intelligent, Tokyo, Japan,1979, 335-337.
- 7 Weng JY, Cohen P, Herniou M. Camera calibration with distortion model and accuracy evaluation. *IEEE- PAMI*, 1992,14(10):965-980.
- 8 张雪波,方勇纯,刘玺.移动机器人自适应视觉伺服镇定控制.控制理论与应用,2010,29(9):1123-1130.
- 9 Datta P, Rhinehart RR. Experimental comparison of a novel, simple, neural net wor cont roller and linear model based cont rollers. Proc American Cont rol Conf,(Seat leWA),1995.1787-1789.
- 10 姜长生,王从庆,魏海坤,陈谋.智能控制与应用.北京:科学出版社,2007.195.

(上接第 180 页)

移动设备存储空间的缺陷, 并且在这种模式下系统能够实时更新数据, 因此成为各行业领域内嵌入式程序开发不可或缺的一部分。

值得一提的是, 由于目前为止 Google map 提供的免费地图服务都是基于浏览器协议的, 所以在已经开发好的程序中嵌入 Google 的免费地图服务时, 可能会大费周章, 甚至需要重新设计程序架构, 即程序的移植性较差。在无线上传本地数据方面, 此处只是实现了简单的 XML 动态表单的传输与校验, 可以进一步考虑数据传输的安全性和实现矢量及栅格数据的实时在线操作、访问功能, 从而改善传统的 GIS 野外数据采集模式, 使野外调绘与数据处理融为一体, 以提高所采集数据的准确度以及整个调查工作的效率。

### 参考文献

- 1 叶轩,邱靖,陈永林,杨毅.Web Services 体系结构研究与应用.云南农业大学学报,2009,24(5):739-745.
- 2 刘建华.Web Services 体系结构与实现机制.福建电脑, 2004,(9):14-15.
- 3 WAP 协议,王康元,张洁.基于 SVG 和 Java 的电力系统节点电压可视化.继电器,2006,34(5):60-61.
- 4 Google static maps API 开发人员指南.
- 5 崔金红,王旭.Google 地图算法研究及实现.计算机科学, 2007,34(11):193-195.
- 6 何丹,常原飞,张迎,乔彦友.基于 PDA 的林业有害生物调查系统设计与实现.测绘科学,2009,34(2):226-228.
- 7 李卫国.基于嵌入式 GIS 的野外调查系统研究.北京,中国科学院遥感应用研究所,2010.