

## 基于投影栅格扫描的无线传感器网络三维定位算法

唐杰\*, 黄宏光

(四川大学 电气信息学院, 成都 610065)

(\*通信作者电子邮箱 275703710@qq.com)

**摘要:**针对现有无线传感器网络(WSN)三维定位算法在精度和复杂度方面的不足,提出了一种改进的三维空间定位算法。利用栅格扫描分别求解邻居锚节点在两个坐标平面的投影交域,得出未知节点在两坐标平面的对应位置,最终实现三维位置估计。仿真结果表明:在100 m×100 m×100 m的空间里,随机投放200个传感器节点,锚节点数为45时,其覆盖率达到了99.1%,相对定位误差仅为0.5533。且平面投影的引入,有效地降低了算法复杂度。

**关键词:**无线传感器网络;三维节点定位;降维;栅格扫描;质心算法

**中图分类号:**TP393.17 **文献标志码:**A

### Three dimensional localization algorithm for wireless sensor networks based on projection and grid scan

TANG Jie\*, HUANG Hongguang

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

**Abstract:** The paper proposed a method to solve the shortcomings of the current Wireless Sensor Network (WSN) three-dimensional localization algorithm in terms of accuracy and complexity. The raster scan was used to resolve the projection cross domain of the neighboring anchor nodes on the two coordinate planes, and got the corresponding positions of the unknown nodes on the two coordinate planes, thus ultimately realizing the three-dimensional position estimate. Finally, the locations of the unknown nodes in three-dimension were estimated. The simulation result shows that when 200 sensor nodes were deployed randomly confined to the space of 100 m \* 100 m \* 100 m, the coverage ratio of unknown nodes reached 99.1%, and the relative error decreased to 0.5533. The use of projection reduced the complexity of the algorithm efficiently.

**Key words:** Wireless Sensor Network (WSN); three-dimensional localization; dimension reduction; grid scan; centroid algorithm

## 0 引言

随着无线通信技术、微系统技术与嵌入式技术的日益成熟,无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)可靠性逐渐提高,应用范围也日渐广泛,如道路状况监控、矿井安全监控和军事侦查等要求高可靠性的领域也开始引入无线传感器网络<sup>[1-3]</sup>。而没有位置信息的传感器节点采集数据通常毫无意义,所以为了提供有效的定位信息,随机部署的传感器节点能够在布置后确定自身的位置至关重要<sup>[4]</sup>。

目前的WSN定位算法,大多数是针对二维平面而设计的,如APIT算法<sup>[5]</sup>、凸规划算法<sup>[6]</sup>、APS(Ad Hoc Position System)<sup>[7]</sup>和MDS-MAP算法<sup>[8]</sup>等。而现实生活中,如对海洋水温、洋流及生物活动的监测,气候及环境污染的监测以及在山区和丛林等复杂地形的传感器网络应用使得单纯的平面定位信息已经满足不了应用的需要。

为此,出现了一些针对无线传感器网络在三维场景下应用的定位算法,如文献[9]提出的Bounding Cube算法,该算法利用未知节点邻居锚节点的通信范围形成立方体,并取立方体交集的质心作为节点估计位置。文献[10]提出了对传感器节点进行三维定位的非距离定位算法——APIS(Approximate Point In Sphere)算法,此算法利用远近邻居锚节点之间的通信范围形成球壳,取这些球壳交集的质心作为节

点估计坐标。两种算法都具有计算简单、计算量小且通信开销小的特点,而且都不需要准确测量节点间的距离,没有额外的硬件开销。但是,前者使用了立方体来近似表述节点的通信范围,本身就不够精确,而且直接使用质心算法也容易引入较大误差;后者在使用质心算法之前也并未对球壳交集做任何减小误差的处理,精度有待提高。

本文将锚节点的球形通信范围向两个坐标平面投影,降低位置信息维度,进而降低了运算的复杂度。再通过投影的覆盖关系,分别在两个坐标平面上采用栅格扫描方法提高所得二维坐标估计值的精度,综合得出节点三维位置信息。最后与相同条件参数下的APIS算法定位结果进行比较。

## 1 投影栅格化扫描算法

### 1.1 栅格化扫描

1) 初始化阶段。邻居锚节点通信范围交集的边界形成估计矩形。

无线传感器网络中,如果一个未知节点接收到来自多个锚节点的信标,则未知节点包含于这几个锚节点的通信范围的交集内。Delta算子递推最小二乘(Delta operator Recursive Least Squares, DRLS)栅格扫描算法<sup>[11]</sup>的基本原理就是利用这个交集的边缘初始化一个估计矩形区域,通过求解这个矩形质心来达到定位的目的,如图1所示。

收稿日期:2013-03-20;修回日期:2013-05-07。

作者简介:唐杰(1988-),男,四川绵阳人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络节点定位、移动通信;黄宏光(1964-),男,四川成都人,副教授,主要研究方向:系统检测、网络管理、无线传感器网络。

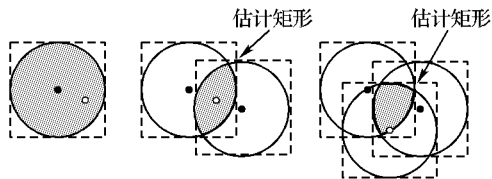


图1 估计矩形的形成

2) 栅格化阶段。将估计矩形以分辨率  $r$  栅格化。

估计矩形区域可描述为:

$$(\hat{x}, \hat{y}) = [\max(x_i - D), \max(y_i - D)] \times [\min(x_i + D), \min(y_i + D)]; i = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

其中:  $(x_i, y_i)$  为各邻居锚节点的坐标,  $D$  为未知节点与锚节点间的距离。该矩形包含了部分未重叠区域, 为节点的估计坐标带来了不小的误差。由此, 引入了栅格扫描的概念。首先, 将矩形区域按分辨率  $r$  分块, 对于长宽分别为  $L, W$  的矩形区域, 得到  $N = \max[L/r] * \max[W/r]$  个栅格的集合  $G = \{G_1, G_2, \dots, G_N\}$ , 并令其中心为  $C_i = (x'_i, y'_i)$ 。各栅格赋初值为 0。如图 2 所示。

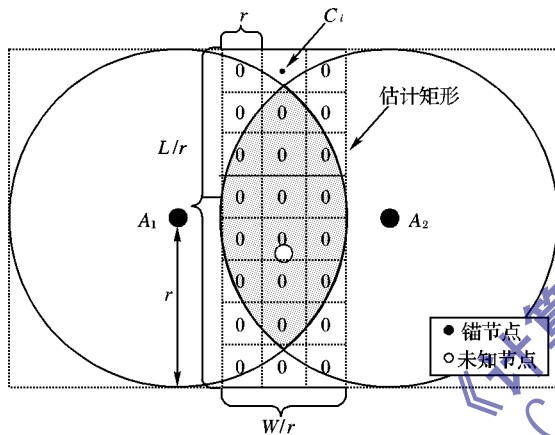


图2 通信交域栅格化

3) 扫描阶段。如图 3 所示, 如果栅格  $G_i$  的中心  $C_i$  处于  $m$  个锚节点的通信范围内, 则给栅格赋值为  $m$ 。估计矩形内所有栅格的值计算出来后,  $m$  值最大的  $k$  个栅格就组成了该未知节点的估计区域, 最终以该区域的质心作为其估计位置:

$$(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^k x'_i + \sum_{i=1}^k y'_i}{k} \quad (2)$$

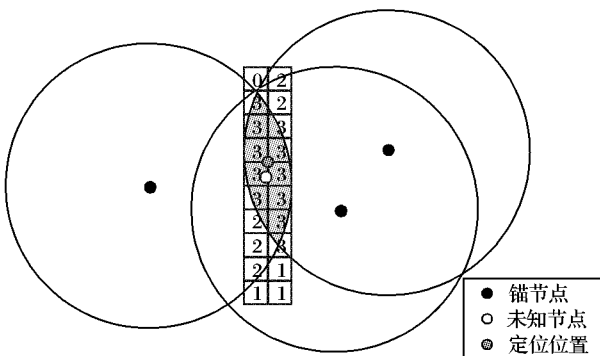


图3 栅格扫描

## 1.2 算法原理

分别以未知节点的邻居锚节点为球心, 两节点之间的距离为半径画球。将球的半径按规则增加一个数值, 则待定位节点必然位于新球体内。取所有球体的交集, 分别向  $XOY$  和  $YOZ$  平面投影, 如图 4 所示。栅格扫描这些投影的重叠区域

就能得出未知节点在两个平面上的坐标  $(x, y), (y', z)$ , 进而得出其三维空间坐标  $(x, y, z)$ 。

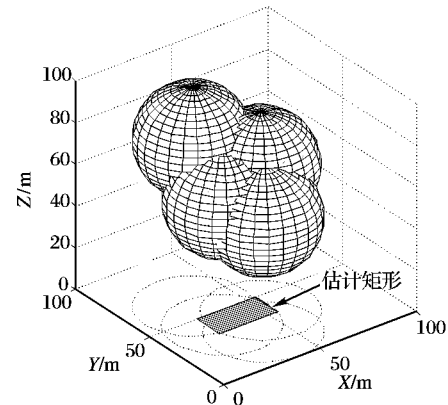


图4 平面投影空间模型

## 1.3 算法步骤

步骤 1 信息交换。各锚节点广播自身 ID 和坐标信息。未知节点侦听, 将来自各邻居锚节点的信息和信号强度记录如表 1 所示。并将自己到邻居锚节点的信号强度代入基于接收信号强度指标 (Received Signal Strength Indicator, RSSI) 的循环求精改进定位算法<sup>[12]</sup>计算节点之间的距离, 计算结果如表 2 所示。

表1 未知节点收到锚节点的 RSSI 值

节点	$X$	$Y$	$Z$	$SS_1$	$SS_2$	$SS_3$	$\dots$	$SS_n$
A	23	33	66	2	1	2	$\dots$	5
B	33	28	68	1	4	3	$\dots$	3
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
X	55	65	33	4	5	8	$\dots$	2

表2 未知节点到锚节点的距离

节点	$X$	$Y$	$Z$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$\dots$	$d_n$
A	23	33	66	100	50	100	$\dots$	250
B	33	28	68	50	200	150	$\dots$	150
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
X	55	65	33	200	250	400	$\dots$	100

步骤 2 投影及初始化栅格。未知节点根据表 2 所提供的信息画球, 向  $XOY$  和  $YOZ$  平面投影, 利用投影交域的边界初始化估计矩形。根据事先制定的边长  $r$  栅格化估计矩形, 保存各栅格的中心点坐标信息。 $r = 0.5$  的情况如表 3 所示。

表3 栅格坐标

投影平面	坐标	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$\dots$	$C_n$
XOY	$x$	30	30.5	31	$\dots$	35
	$y$	58	58.5	59	$\dots$	62
YOZ	$y'$	56	56.5	57	$\dots$	61
	$z$	77	77.5	78	$\dots$	82

步骤 3 栅格扫描。在两个平面上计算各栅格的中心点到各锚节点的距离并与表 2 数据相比较, 如果计算值小于表 2 的对应值, 则相应栅格的  $m$  值加 1。其值如表 4 所示。

表4 栅格被扫过的次数

投影平面	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$\dots$	$C_n$
XOY	2	9	11	$\dots$	6
YOZ	5	3	8	$\dots$	7

步骤 4 位置估计。根据表 4 中  $m$  值最大的栅格数据,

由式(2)求解这些栅格的质心,得 $(x,y)$ 、 $(y',z)$ ,最终得未知节点三维坐标:

$$(x,y,z) = \left(x, \frac{y+y'}{2}, z\right) \quad (3)$$

## 2 实验仿真和结果分析

### 2.1 仿真背景

本文使用 Matlab 7.12.0 软件对算法进行了不同参数条件下的仿真分析。测试中,200 个传感器节点被随机投放在  $100\text{ m} \times 100\text{ m} \times 100\text{ m}$  的空间里,且未知节点与锚节点的通信半径相同。

### 2.2 关键参数

1)覆盖率。指能被定位的节点数占所有未知节点的比例。本文每个未知节点至少需要 3 个邻居锚节点才能实现位置估计,故节点覆盖率为:

$$CR = \frac{n'}{N} \times 100\% \quad (4)$$

其中: $n'$  为有 3 个及以上邻居锚节点的未知节点个数, $N$  为未知节点总数。

2)相对误差。指节点估计位置距节点实际位置的长度与节点通信半径的比值。

$$PE = \frac{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}}{R} \times 100\% \quad (5)$$

其中: $(x,y,z)$  为节点的估计位置, $(x_0,y_0,z_0)$  为节点的实际位置, $R$  为节点的通信半径。

### 2.3 仿真结果分析

一次仿真定位结果如图 5 所示,其中锚节点个数为 45,节点的通信半径  $R=50\text{ m}$ ,栅格长度  $r=0.5\text{ m}$ 。经计算得,能定位节点数为 154,定位覆盖率为 99.35%,平均相对定位误差 0.5636。每个节点的相对定位误差如图 6 所示。

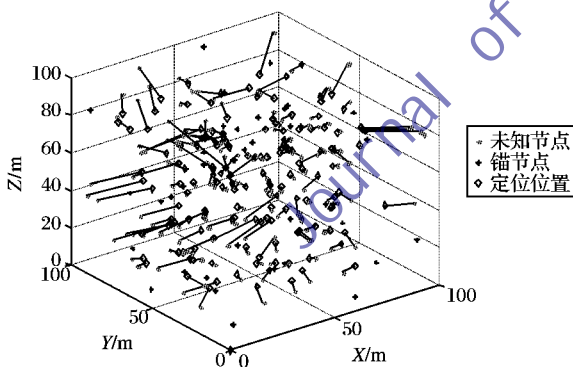


图5 三维定位效果图

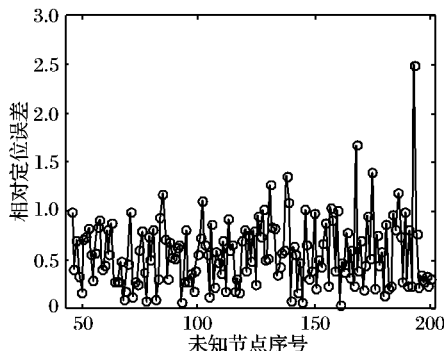


图6 三维定位节点误差

1)锚节点比例及栅格分辨率对定位精度的影响。

图7描述了在通信半径  $R=45\text{ m}$ ,锚节点比例  $=0.1 \sim$

0.2,栅格长度  $r=0.5 \sim 10\text{ m}$  时锚节点比例和栅格长度对未知节点定位误差的影响(对同等情况下的20次仿真结果取平均值)。栅格长度越小则栅格的分辨率越高,能用于估算未知节点坐标的栅格数增多,得出的结果就越精确。当栅格长度增加到一定值,已经超过了某些未知节点的估计矩形边长时,会导致估计矩形扩大,使得在这些节点处误差增加幅度变大,造成节点的平均相对误差幅度增加。体现在图中锚节点比例一定时,相对误差随着栅格长度的增加而增大,而且误差增长幅度也随之变大。

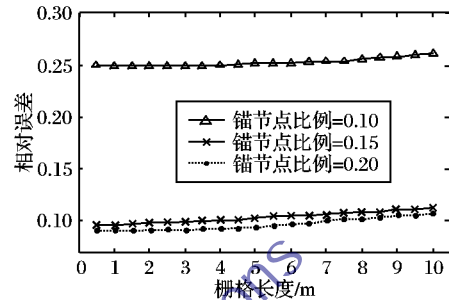


图7 锚节点比例和栅格长度对误差的影响

2)锚节点比例及通信半径对定位精度的影响。

同等条件下的20次仿真结果取均值得到如表5的数据。节点通信半径一定时,锚节点数越多,定位精度越高。锚节点数目一定时,通信半径增加也能提高定位精度。而且,节点通信半径  $R$  的增加对定位精度的提高呈现逐步减缓的趋势,当  $R$  增长到一定程度时,不同锚节点数情况下的定位相对误差趋于相同,如图8所示。

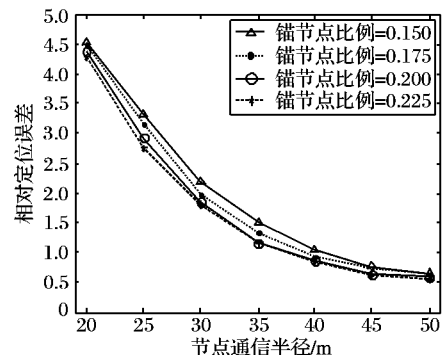


图8 锚节点比例和通信半径对误差的影响

这是因为,通信半径的增加,提高了节点的覆盖率,未知节点的邻居锚节点数更多,得出的定位数据更精确,而且原来无法定位的节点数也随之减小,使得锚节点数投放较少的情况也能达到高投放比例的效果。但高的通信半径会带来更大的能量开销,在实际的应用中,应综合考虑成本和持续性的关系,在满足定位精度要求的条件下,合理选取锚节点投放比例和节点通信半径。

3)本文算法与 APIS 算法定位性能比较。

如图9所示,在低锚节点投放率的情况下(锚节点比例  $< 12.5\%$ ),两种算法的定位误差都超过未知节点通信半径的一倍。但随着锚节点比例的增大,本文算法定位精度提高更快。当锚节点数为 20(锚节点比例  $= 12.5\%$ )时,算法定位精度比 APIS 高 43.2%。

继续加大锚节点投放,两种算法的定位精度进一步提高。APIS 算法中,未知节点能用来定位的锚节点数越多,用于定位的球壳交集越小,质心算法所带来的误差随之减小,使得两种算法的精度差距缩小。

表5 不同锚节点数和通信半径对应的覆盖率和定位精度

$R$	锚节点数为 30		锚节点数为 35		锚节点数为 40		锚节点数为 45	
	覆盖率	相对误差	覆盖率	相对误差	覆盖率	相对误差	覆盖率	相对误差
20	0.0518	4.5383	0.0691	4.4792	0.1044	4.3805	0.1426	4.2744
25	0.1935	3.3296	0.2539	3.1611	0.3388	2.9310	0.3884	2.7556
30	0.4476	2.1875	0.5364	1.9879	0.5938	1.8484	0.6316	1.8028
35	0.6718	1.5092	0.7382	1.3381	0.8088	1.1615	0.8161	1.1554
40	0.8276	1.0513	0.8521	0.9361	0.8975	0.8730	0.9329	0.8409
45	0.9141	0.7734	0.9467	0.7404	0.9756	0.6370	0.9852	0.6215
50	0.9594	0.6525	0.9721	0.6292	0.9881	0.5960	0.9910	0.5533

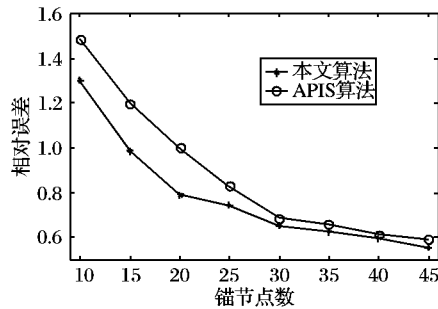


图9 本文算法与 APIS 算法定位结果比较

由表6的数据可以看出,本文算法通过降维,大大减少了节点定位时间。在高锚节点投放比例的情况下,两算法定位精度趋同,但本文算法计算量更小,定位速度更快,更好地满足了 WSN 对能量开销的要求。

表6 本文算法与 APIS 算法平均定位时间比较 ms

锚节点数	APIS 算法	本文算法	锚节点数	APIS 算法	本文算法
10	432	125	35	1579	404
15	689	157	45	1820	492
25	1201	265			

### 3 结语

本文提出了一种基于投影和栅格扫描的 WSN 三维定位算法,利用空间向平面投影降低算法复杂度,且锚节点只进行一次广播,减少了通信量,达到节省节点能量的目的。栅格扫描的使用也进一步降低了节点定位误差。仿真实验测试了主要参数对定位的影响,结果表明,该算法能够满足传感器网络三维空间定位的要求,具有较高的定位精度。

#### 参考文献:

[1] 孙利民,李建中,陈渝,等.无线传感器网络[M].北京:清华大学

出版社,2005:135-154.

- [2] 任丰原,黄海宁,林闯.无线传感器网络[J].软件学报,2003,14(7):1282-1291.
- [3] 孙亭,杨永田,李立宏.无线传感器网络技术发展现状[J].电子技术应用,2006(6):27-29.
- [4] 余成波,李洪兵,陶红艳.无线传感器网络实用教程[M].北京:清华大学出版社,2012:48-136.
- [5] HE T, HUANG C D, BLUM B M, *et al.* Range-free localization schemes in large scale sensor networks [C]// Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2003: 81-95.
- [6] DOHERLY L, CHAOUI L E, PISTER K S J. Convex position estimation in wireless sensor networks [C]// Proceedings of the IEEE INFOCOM 2001. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2001: 1655-1663.
- [7] NICULESCU D, NATH B. Ad Hoc Positioning Systems (APS) [C]// Proceedings of the GLOBECOM 2001 IEEE Global Telecommunications Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2001: 2926-2931.
- [8] 陈岁生,卢建刚,楼晓春.基于 MDS-MAP 和非线性滤波的 WSN 定位算法[J].浙江大学学报:工学版,2012,46(5):866-872.
- [9] 李娟,王珂,卢长冈.Bounding Cube:一种无线传感器网络节点三维定位算法[J].中国海洋大学学报,2009,39(6):1265-1268.
- [10] 吕良彬,曹阳,高洵,等.基于球壳交集的传感器网络三维定位算法[J].北京邮电大学学报,2006,29(S1):48-51.
- [11] SHEU J P, CHEN P C, HSU C S. A distributed localization scheme for wireless sensor networks with improved grid-scan and vector-based refinement [J]. IEEE Transactions on Mobile Communication, 2008,7(9):1110-1123.
- [12] 颜嘉俊,雷勇.基于 RSSI 的无线传感器网络节点定位[J].计算机仿真,2012,29(7):151-154.

(上接第2469页)

#### 参考文献:

- [1] 饶运涛,邹继军,王进宏,等.现场总线 CAN 原理与应用技术[M].北京:北京航空航天大学出版社,2003.
- [2] 广州智维电子科技有限公司. CAN 总线培训教材[EB/OL]. [2013-03-02]. [http://www.triv.cn/info\\_pxxx.asp?id58](http://www.triv.cn/info_pxxx.asp?id58).
- [3] 马明.基于现场总线的汽车信息系统的研究[D].长沙:湖南大学,2011.
- [4] 周跃刚.基于 LabVIEW 和 J1939 协议的 CAN 总线通讯平台构建[J].汽车科技,2011(6):18-22.
- [5] 杨丰盛.Android 技术内幕:系统卷[M].北京:机械工业出版社,2011.
- [6] SAE J1939. Recommended practice for a serial control and communications vehicle network[S]. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 2005.
- [7] van DIJCK K. linux-can-can-j1939-modules/Documentation[EB/OL]. [2013-03-16]. <https://gitorious.org/~kurt-vd/linux-can/linux-can-j1939/trees/master>.
- [8] 飞凌嵌入式 TE6410 开发板硬件手册[EB/OL]. [2013-03-12]. [ftp://wcm.csu.edu.cn/released\\_by\\_others/limingxuan/TE6410/用户手册\(请先看这里\)/TE6410开发板硬件手册.pdf](ftp://wcm.csu.edu.cn/released_by_others/limingxuan/TE6410/用户手册(请先看这里)/TE6410开发板硬件手册.pdf).
- [9] USB CAN II 调试器用户手册 V5.0[EB/OL]. [2013-03-12]. <http://www.freedesign.net.cn/download.html>.
- [10] SAE J1939-21, SAE J1939 Protocol Part2: data link layer[S]. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 2009.
- [11] SAE J1939-01, SAE J1939 Protocol Part0: truck and bus specific [S]. Society of Automotive Engineers, 2009.
- [12] SAE J1939-71, SAE J1939 Protocol Part7-1: applications layer[S]. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 2009.