

文章编号: 2095-2163(2021)01-0041-05

中图分类号: V279; V249

文献标志码: A

基于 openmv 的无人机定点降落视觉识别技术研究

吴文秀¹, 关志全¹, 汪磊¹, 郑军斌¹, 阳璞琼^{1,2}

(1 南华大学 电气工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2 磁约束核聚变研究重点实验室(南华大学), 湖南 衡阳 421001)

摘要: 无人机广泛应用于军事、农业、交通运输等方面, 具有巨大的应用潜力和广阔前景。受电池能量密度和能量利用效率等因素的制约, 无人机机载电池没有足够的续航能力, 发挥不了最大优势。为提高无人机的飞行续航能力, 采用无线充电基站对无人机进行充电。为达到无线充电的最大充电效率, 需要实现无人机精确降落。为了实现无人机的定点降落, 提高定点飞行能力, 提出了一种 GPS 和视觉识别相结合定点降落方法。首先通过 pixhawk 飞控模块配合 M8N 模块来进行 GPS 定位, 使无人机到达充电基站附近, 然后通过再启用视觉辅助(openmv)实现较精准的降落。实验结果表明, 无人机能够准确识别充电基站从而实现定点降落。

关键词: 无人机; 视觉识别; openmv; 定点降落

Research on UAV fixed-point landing visual recognition technology based on openmv

WU Wenxiu¹, GUAN Zhiquan¹, WANG Lei¹, ZHENG Junbin¹, YANG Puqiong^{1,2}

(1 School of Electrical Engineering, University of South China, Hengyang Hunan 421001, China; 2 The Key Laboratory of Magnetic Confinement Nuclear Fusion Research(University of South China), Hengyang Hunan 421001, China)

【Abstract】 Unmanned Aerial Vehicle (UAV) is widely used in military, agriculture, transportation and other fields, and has great application potential and broad prospects. Restricted by factors such as battery energy density and energy utilization efficiency, the onboard battery of UAV does not have enough endurance, which can't give full play to its advantages. In order to improve the flight endurance of UAV, wireless charging base station is used to charge UAV. In order to achieve the maximum charging efficiency of wireless charging, it is necessary to realize the accurate landing of UAV. In order to realize the fixed-point landing of UAV and improve its fixed-point flight capability, a fixed-point landing method combining GPS and visual recognition is proposed. At first, the pixhawk flight control module is matched with M8N module to carry out GPS positioning, so that the UAV can reach the vicinity of the charging base station, and then, the visual aid (openmv) is enabled again to achieve a more accurate landing. The experimental results show that the UAV can accurately identify the charging base station and realize fixed-point landing.

【Key words】 UAV; visual recognition; openmv; fixed point landing

0 引言

目前, 各类科技创新有效地推动了现代无人机技术的发展。无人机广泛用于气象探测、灾害监测、农药喷洒、地质勘测、地图测绘、交通管制等诸多领域^[1-5]。近些年来, 无人机技术取得了长足进步, 且应用领域正在不断拓展, 对其各项技术指标也随即提出了更高的要求。传统的无人机技术主要依靠惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)和全球定位系统(Global Position System, GPS)进行导航, 然而, 导航过程中的惯性器件具有累积误差, 对初始值过于敏感, 而 GPS 并不总是可获取的, 并且即使是可获取, 精度也无法满足无人机导航要求^[6-7]。

随着现代技术的发展, 计算机视觉导航开始逐步走上无人机技术领域的舞台^[8-11]。计算机视觉技术利用搭载的摄像头获取外界环境的数字图像信息, 通过计算机算法分析解算获取图像的有效信息^[12-14], 比如形状、尺度等, 无人机根据这些有效信息进行相应的操作到达目的地。张义桢等人^[15]提出了一种基于二维码图像识别的无人机定位方法。AprilTag 标志的样式与二维码比较相似但是却没有那么复杂, 可以减少处理器所需要的计算量, 满足一些实时性的要求。

本文主要研究了无人机的定点降落相关技术, 系统的主要流程是先通过 GPS 使无人机降落到充电基站附近, 再通过视觉装置 openmv 识别充电基站

基金项目: 国家自然科学基金(11675074); 湖南省教育厅科技计划(16C1369)。

作者简介: 吴文秀(1998-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力电子、高功率电子学研究; 关志全(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力电子、核能科学与工程研究; 阳璞琼(1980-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 电力电子技术、核能科学与工程研究。

通讯作者: 阳璞琼 Email: rocket80@163.com

©1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>
收稿日期: 2020-11-09

哈尔滨工业大学主办 ◆ 学术研究与应用

上的 AprilTag 图标,实现定点降落。研究了 openmv 与飞控 pixhawk 之间的通信以及 openmv 识别 AprilTag 图标的相关代码编写和测试。

1 系统总体设计

以实现无人机的定点降落为目标进行系统设计,系统整体框图如图 1 所示。

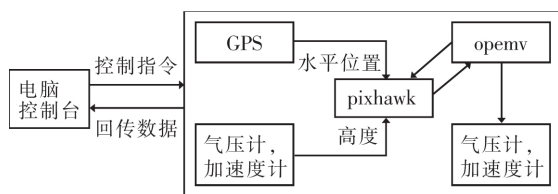


图 1 整体框图

Fig. 1 Overall block diagram

为实现无人机的定点降落控制过程,先通过 GPS 导航至指定地点附近(无人机充电基站位置),依靠气压计和加速度计控制好高度(GPS 数据和高度数据由当前选择降落的无线充电基站提供),再启用视觉辅助实现较精准的降落。系统主要涉及到飞控和视觉模块两大块,飞控和视觉处理模块均搭载在同一架无人机平台上。电脑端作为主机端,负责接收无人机数据和传达指令给无人机^[16-18]。

电脑控制台与无人机间,无人机搭载的飞控模块和视觉模块间都需要进行通信。电脑控制台主要与 pixhawk 飞控模块进行信息交流,而 pixhawk 与 openmv(视觉模块)之间也可直接通信。由此看出, pixhawk 是整个自动降落系统中比较核心的部分,并且将全面控制着无人机的运动,处理来自电脑端和 openmv 的数据,其中电脑控制台与 pixhawk 间的通信不再赘述。

2 视觉定位原理

视觉定位采用开源视觉模块 openmv。这部分的主要作用为:当无人机通过 GPS 导航至充电基站附近时(x, y, z 方向距离在 1 m 左右),启用摄像头,在当前视野中搜寻目标点。

基站上需要安装带有一定信息量的标识,帮助视觉模块判断当前自己相对于目标点的位置。需要多个自由度的信息,分别指的是 x, y, z 轴的位移和 yaw (或者说 z 轴)旋转角度(以无人机为参考点)。

暂定的对齐步骤为(以下步骤均以无人机为原点建立坐标系,见图 2,且各步骤的定位信息来源均依靠视觉模块,不再依靠 GPS):

(1) 旋转。机头到与充电基站头部平行(以无

人机机头与机尾所在直线位于 x 轴,如果基站的对准未做特殊要求的话, 0° 和 180° 均可,默认对齐到 0° 的状态。

(2) 高度不变,水平平移。此时通过测得的 x, y 轴距离值,控制好无人机的飞行姿态后,再飞行到充电基站的正上方。

(3) 控制无人机平稳下落至目标点上,下落过程中,不断进行距离及旋转角度的校正^[19-20]。

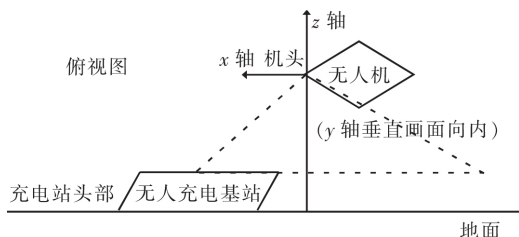


图 2 以无人机为原点建立的坐标系

Fig. 2 Coordinate system established with UAV as the origin

采用 AprilTag 标志标识充电基站, AprilTag 是一个第三方的视觉基准库而且在机器人位置识别等领域得到了广泛使用。一些 AprilTag 标志如图 3 所示。使用 AprilTag 进行位置计算时可以分为 2 步:获取 tag 和计算 tag。其中,获取 tag 基本方法是去寻找场景中可能是属于 tag 系列的各种图样,这种图形样式也有利于辨别黑白边缘特征。将 tag 标识的外观信息提取完毕,还需要相机的焦距和图像分辨率大小信息。相机的焦距由使用的 openmv 摄像头参数决定,图像分辨率则由具体编程和实际测试确定^[21-22]。

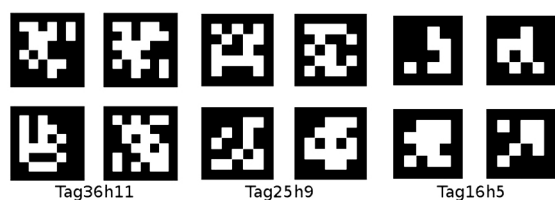


图 3 AprilTag 家族成员

Fig. 3 AprilTag family members

3 软件设计

3.1 系统总体软件流程

无人机定点自动降落过程中,首先通过 GPS 定位降落到目标点附近,打开 openmv 摄像头,系统获取到 AprilTag 标志时,无人机进入自稳模式。自稳模式下,无人机的油门及角度控制没有被锁定,控制很自由。对获取到的 AprilTag 标志进行分析,通过 pixhawk 调整无人机姿态完成降落。整个系统软件流程图如图 4 所示。

pixhawk 代码的主要编写位置在“自稳模式”代码处,基于该模式,进行与 openmv 联动的代码编写。

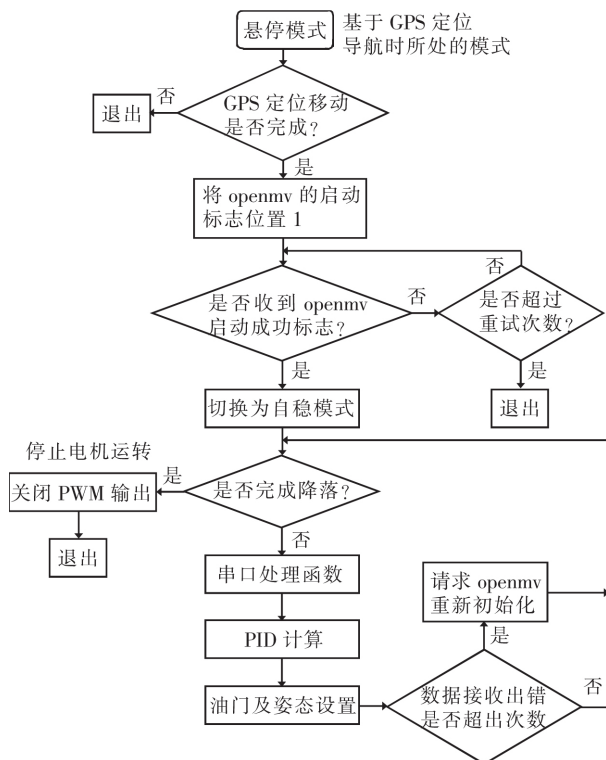


图 4 软件流程图

Fig. 4 Software flow chart

3.2 视觉处理模块软件流程

视觉处理方面使用 openmv 模块,加上 AprilTag 标识来实现无人机的位置计算。openmv 部分代码的主要功能为计算当前相对于目标点的位置,并通过串口按照自订协议传输相关数据^[23]。openmv 视觉处理流程如图 5 所示。

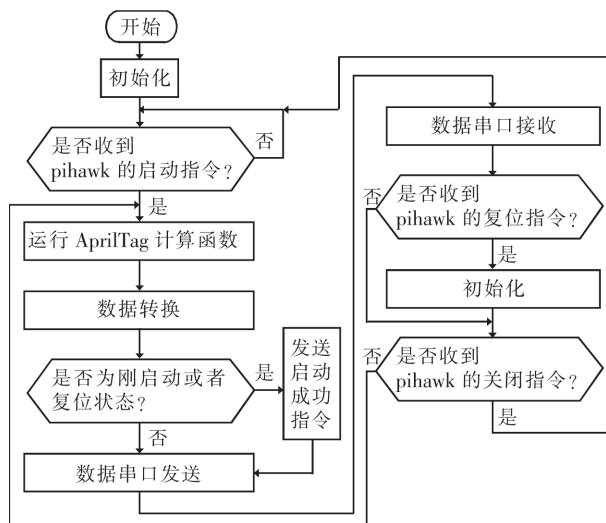


图 5 openmv 视觉处理流程图

Fig. 5 openmv visual processing flow chart

4 软件程序代码设计

视觉处理主要代码参见如下:

```
sensor.reset()
sensor.set_pixformat(sensor.RGB565)
sensor.set_framesize(sensor.QQVGA)
sensor.skip_frames(time = 2000)
sensor.set_auto_gain(False) # 关闭自动增益
sensor.set_auto_whitebal(False) # 关闭白平衡
clock = time.clock()
uart = UART(3, 115200) # 定义串口 3 变量
uart.init(115200, bits = 8, parity = None, stop = 1) # 串口配置定义
```

这里设置好了 openmv 的一些基本参数。`sensor.set_pixformat` 用于设置像素模式,代码里设置为彩色图像模式 RGB565,每个像素 16bit。`sensor.set_framesize` 用于设置图像的分辨率,这里考虑到了 stm32 的性能和需要的帧率要求,将其值设为 `sensor.QQVGA`,即 openmv 里定义的 160×120 分辨率。`set_auto_gain (False)` 和 `set_auto_whitebal (False)` 用于关闭 openmv 的自动增益和白平衡的功能,因为这 2 个功能对 AprilTag 的处理有影响。时钟和串口的初始化代码依次展开如下:

```
fx = (2.8 / 3.984) * 160 # 默认值
fy = (2.8 / 2.952) * 120 # 默认值
cx = 160 * 0.5 # 默认值(image.w * 0.5)
cy = 120 * 0.5 # 默认值(image.h * 0.5)
img = sensor.snapshot() # 截取一帧图像
for tag in img.find_apriltags(fx = fx, fy = fy, cx = cx, cy = cy): # 默认为 TAG36H11
```

代码中, `find_apriltags()` 函数可获取摄像头相对于当前目标的位置和角度信息,然后将处理得到的值存储到 tag 中。函数的传入值共有 4 个,即: `fx`, `fy`, `cx` 和 `cy`,其他传入值没写出则保持默认(默认选择 AprilTag 的 TAG36H11 家族)。在设置上面提到的 4 个值时,需根据一些硬件配置和软件配置进行选择。图中的 2.8 代表的是所用摄像头的焦距信息。而 3.984 和 2.952 两个值则是所使用的感光元件尺寸(本课题使用的 openmv 型号为 openmv3,感光元件为 ov7725)。160 与 120 即是所设置的分辨率了。0.5 为默认值,无需变动。`sensor.snapshot()` 函数为立即截取当前摄像头图像。每截取一张图像,即开始寻找 AprilTag 标识,初步计算出相对位置和角度。位置及角度的转换代码详见如下。


```

    p_x[0] = int( tag.x_translation() * k1/100%
10) # 获取 x 轴位移的个位( 单位 m)
    p_x[1] = int( tag.x_translation() * k1/10%
10) # 获取 x 轴位移的 0.1 位( 单位 m)
    p_x[2] = int( tag.x_translation() * k1/1%10)
# 获取 x 轴位移的 0.01 位( 单位 m)
    p_y[0] = int( tag.y_translation() * k1/100%
10) # 获取 y 轴位移的个位( 单位 m)
    p_y[1] = int( tag.y_translation() * k1/10%
10) # 获取 y 轴位移的 0.1 位( 单位 m)
    p_y[2] = int( tag.y_translation() * k1/1%10)
# 获取 y 轴位移的 0.01 位( 单位 m)
    p_z[0] = int( tag.z_translation() * k1/100%
10) # 获取 z 轴位移的个位( 单位 m)
    p_z[1] = int( tag.z_translation() * k1/10%
10) # 获取 z 轴位移的 0.1 位( 单位 m)
    p_z[2] = int( tag.z_translation() * k1/1%
10) # 获取 z 轴位移的 0.01 位( 单位 m)
    r_z[0] = int( degrees( tag.z_rotation() ) /
100%10) # 获取 z 轴角度的百位( 单位( °) )
    r_z[1] = int( degrees( tag.z_rotation() ) /
10%10) # 获取 z 轴角度的十位( 单位( °) )
    r_z[2] = int( degrees( tag.z_rotation() ) /
1%10) # 获取 z 轴角度的个位( 单位( °) )

```

通过实际测试,可以得到一个 AprilTag 测出的距离与实际距离的比例值 $k1$,然后在运算时考虑进去。角度无需使用比例系数,但需要进行弧度与角度的转换($degrees()$ 函数)。位置和角度将按照协议规定进行处理。之后即可调用相应的串口发送函数将信息传递到 pixhawk 端。

研究中给出了实现 openmv 定位精度测试及视觉定位的关键代码,具体如下。

```

while( True):
    clock.tick()
    img = sensor.snapshot()
    for tag in img.find_apriltags( fx = f_x , fy = f_y ,
cx = c_x , cy = c_y): # 默认为 TAG36H11
        img.draw_rectangle( tag.rect() , color = ( 255 , 0 ,
0) ) # 画矩形
        img.draw_cross( tag.cx() , tag.cy() , color = ( 0 ,
255 , 0) ) # 在矩形中心画十字
        print_args = ( tag.x_translation() , tag.
y_translation() , tag.z_translation() ,
degrees( tag.x_rotation() ) , degrees( tag.

```

```

y_rotation() ) , degrees( tag.z_rotation() ) )
    print( "Tx: %f , Ty %f , Tz %f , Rx %f , Ry %f ,
Rz %f" % print_args)
    print( clock.fps() ) # 打印帧率

```

上面用于测试的一小段代码,主要作用是将 AprilTag 函数获取的信息通过串口直接打印在电脑端的 openmv IDE 界面上,同时也会将运行帧率打印出来。本次测试使用电脑屏幕显示 AprilTag 标记,方便随时调整标记的大小。测试时要注意,不要将屏幕的亮度调太高,过高的亮度会使摄像头观察到的 AprilTag 标记被白光掩盖,将会严重影响 AprilTag 的识别效果(眩光干扰)。

5 实验分析

为了验证系统有效性,进行了相关的实验,距离 AprilTag 标记 15 cm 的实验结果如图 6 所示。

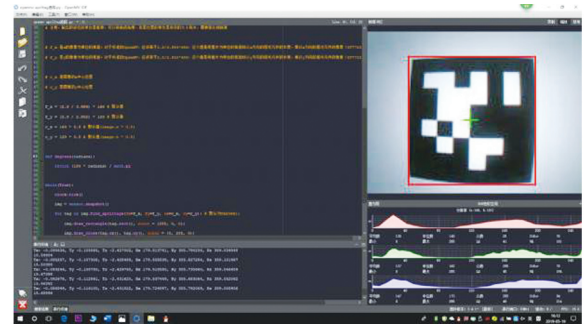


图6 距离 AprilTag 标记 15cm

Fig. 6 The distance is 15 cm from AprilTag

测试数据见表 1(忽略正负,位移单位为 m,角度单位为(°)。15 cm 时测定的比例系数 6.17 作为测量时的距离校正。表格的数据为 openmv 测得的数值)。

表 1 openmv 测试数据

Tab. 1 openmv test data

x 轴位移	y 轴位移	z 轴位移	平均误差 /%	z 轴角度	平均误差 /%
0.01	0.01	0.15	1.3	359	0.3
0.23	0.52	0.64	3.1	63	0.9
1.03	0.03	1.01	3.5	48	1.2
0.05	0.96	1.03	3.4	312	1.2

经过测量,当 AprilTag 的标记大小为 12 cm 边长的正方形时,最近的识别距离为 0.15 m(垂直距离),系统获取到的视觉目标清晰有效。最远也符合论述的范围。误差均在容忍范围之内。

openmv 搭载到无人机上时,要注意使用自稳云台,确保无人机在调控姿态时摄像头始终是垂直向下的。openmv 的供电直接由 pixhawk 的 5 V 供电提

供。接下来可连接好 openmv 与 pixhawk 的串口通信接口。

6 结束语

以无人机为研究对象,研究了一种无人机定点降落的方式,较传统的降落方式,采用了机器视觉 openmv 和新的地面识别图标,该标识包含 6 个自由度信息,为无人机的位置判断提供比 GPS 更加准确的参考。通过对 openmv 视觉识别系统的探讨开发,为无人机定点降落的研究开拓了一些新的思路。

参考文献

- [1] FENG Quanlong, LIU Jiantao, GONG Jianhua. UAV remote sensing for urban vegetation mapping using Random Forest and texture analysis[J]. Remote Sensing, 2015, 7(1): 1074-1094.
- [2] 祁圣君,井立,王亚龙. 无人机系统及发展趋势综述[J]. 飞航导弹, 2018(4): 17-21.
- [3] 汤明文,戴礼豪,林朝辉,等. 无人机在电力线路巡视中的应用[J]. 中国电力, 2013, 46(3): 35-38.
- [4] 李德仁,李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(5): 505-513, 540.
- [5] 范承啸,韩俊,熊志军,等. 无人机遥感技术现状与应用[J]. 测绘科学, 2009, 34(5): 214-215.
- [6] 聂博文,马宏绪,王剑,等. 微小型四旋翼飞行器的研究现状与关键技术[J]. 电光与控制, 2007, 14(6): 113-117.
- [7] 赵文一. 无人机视觉辅助自主降落系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [8] 吴显亮,石宗英,钟宜生. 无人机视觉导航研究综述[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(S1): 62-65.
- [9] 钟木财,何炳蔚,曾金源,等. 基于单目视觉的无人机自主跟踪降落研究[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(4): 149-152, 187.
- [10] 王旭峰,董新民,孔星炜,等. 视觉辅助的无人机自主空中加油建模与仿真[J]. 飞行力学, 2013, 31(4): 331-335.
- [11] 范保杰,朱琳琳,崔书平,等. 旋翼无人机视觉跟踪系统[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(1): 149-152.
- [12] 王海罗. 基于视觉感知的无人机目标识别与跟踪技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [13] 苏冀,王挺,姚辰,等. 基于合作目标的无人机目标跟踪方法[J]. 机器人, 2019, 41(4): 425-432.
- [14] 韩鹏,耿增显,刘宏,等. 无人机视觉识别与移动追踪技术综述[J]. 飞航导弹, 2018(10): 24-28.
- [15] 张义桢,向婕,唐立军. 基于二维码图像识别的无人机定位方法研究[J]. 计算机应用与软件, 2019, 36(9): 117-121.
- [16] 徐贵力,倪立学,程月华. 基于合作目标和视觉的无人飞行器全天候自动着陆引导关键技术[J]. 航空学报, 2008(2): 437-442.
- [17] 李永健. 基于机器视觉的四旋翼无人机定点着陆系统设计与实现[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [18] 金伟,葛宏立,杜华强,等. 无人机遥感发展与应用概况[J]. 遥感信息, 2009(1): 88-92.
- [19] 索文凯,胡文刚,张炎,等. 无人机自主降落过程视觉定位方法研究[J]. 激光技术, 2019, 43(5): 101-106.
- [20] 吴赛飞. 基于视觉信息引导的舰载无人机精确着舰技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [21] 崔红霞,林宗坚,孙杰. 无人机遥感监测系统研究[J]. 测绘通报, 2005(5): 11-14.
- [22] WATANABE Y, FABIANI P. Optimal guidance design for UAV visual target tracking in an urban environment [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2010, 43(15): 69-74.
- [23] GUPTA K, EMRAN B J, NAJJARAN H. Vision-based pose estimation of a multi-rotor unmanned aerial vehicle [J]. International Journal of Intelligent Unmanned Systems, 2019, 7(3): 120-132.
- [3] KIPF T N, WELLING M. Semi-supervised classification with graph Convolutional Networks [J]. arXiv preprint arXiv: 1609.02907, 2016.
- [4] MIKOLOV T, SUTSKEVER I, CHEN Kai, et al. Distributed representations of words and phrases and their compositionality [C] // Proceedings of the 26th International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS'13). NY, United States: NIPS, 2013, 2: 3111-3119.
- [5] LIU Pengfei, QIU Xipeng, HUANG Xuanjing. Recurrent Neural Network for text classification with multi-task learning [C] // Proceedings of the Twenty-Fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'16). New York: IJCAI, 2016: 2873-2879.
- [6] LUO Yuan, SOHANI A R, HOCHBERG E P, et al. Automatic lymphoma classification with sentence subgraph mining from pathology reports [J]. Journal of the American Medical Informatics Association, 2014, 21(5): 824-832.
- [7] GORI M, MONFARDINI G, SCARSELLI F. A new model for learning in graph domains [C] // Proceedings of 2005 IEEE International Joint Conference on Neural Network. Montreal, Que. Canada: IEEE, 2005: 729-734.
- [8] SCARSELLI F, GORI M, TSOLA C, et al. The graph neural network model [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2009, 20(1): 61-80.
- [9] DEFFERRARD M, BRESSON X, VANDERGHEYNST P. Convolutional neural networks on graphs with fast localized spectral filtering [C] // Proceedings of the 30th International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS'16). Barcelona, Spain: NIPS, 2016: 3844-3852.
- [10] KIPF T N, WELLING M. Semi-supervised classification with graph Convolutional Networks [J]. arXiv preprint arXiv: 1609.02907, 2016.
- [11] YAO Liang, MAO Chengsheng, LUO Yuan. Graph convolutional networks for text classification [C] // AAAI Conference on Artificial Intelligence. Honolulu, Hawaii, USA: AAAI, 2019, 33: 7370-7377.
- [12] ZENG Jichuan, LI Jing, SONG Yan, et al. Topic memory networks for short text classification [J]. arXiv preprint arXiv: 1809.03664, 2018.
- [13] BLEI D M, NG A Y, JORDAN M I, et al. Latent Dirichlet allocation [J]. Journal of Machine Learning Research, 2012, 3: 993-1022.
- [14] THEKUMPARAMPIL K K, WANG Chong, OH S, et al. Attention-based graph neural network for semi-supervised learning [J]. arXiv preprint arXiv: 1803.03735, 2018.

(上接第40页)

- [3] KIPF T N, WELLING M. Semi-supervised classification with graph Convolutional Networks [J]. arXiv preprint arXiv: 1609.02907, 2016.
- [4] MIKOLOV T, SUTSKEVER I, CHEN Kai, et al. Distributed representations of words and phrases and their compositionality [C] // Proceedings of the 26th International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS'13). NY, United States: NIPS, 2013, 2: 3111-3119.
- [5] LIU Pengfei, QIU Xipeng, HUANG Xuanjing. Recurrent Neural Network for text classification with multi-task learning [C] // Proceedings of the Twenty-Fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'16). New York: IJCAI, 2016: 2873-2879.
- [6] LUO Yuan, SOHANI A R, HOCHBERG E P, et al. Automatic lymphoma classification with sentence subgraph mining from pathology reports [J]. Journal of the American Medical Informatics Association, 2014, 21(5): 824-832.
- [7] GORI M, MONFARDINI G, SCARSELLI F. A new model for learning in graph domains [C] // Proceedings of 2005 IEEE International Joint Conference on Neural Network. Montreal, Que. Canada: IEEE, 2005: 729-734.
- [8] SCARSELLI F, GORI M, TSOLA C, et al. The graph neural network model [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2009, 20(1): 61-80.
- [9] DEFFERRARD M, BRESSON X, VANDERGHEYNST P. Convolutional neural networks on graphs with fast localized spectral filtering [C] // Proceedings of the 30th International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS'16). Barcelona, Spain: NIPS, 2016: 3844-3852.
- [10] KIPF T N, WELLING M. Semi-supervised classification with graph Convolutional Networks [J]. arXiv preprint arXiv: 1609.02907, 2016.
- [11] YAO Liang, MAO Chengsheng, LUO Yuan. Graph convolutional networks for text classification [C] // AAAI Conference on Artificial Intelligence. Honolulu, Hawaii, USA: AAAI, 2019, 33: 7370-7377.
- [12] ZENG Jichuan, LI Jing, SONG Yan, et al. Topic memory networks for short text classification [J]. arXiv preprint arXiv: 1809.03664, 2018.
- [13] BLEI D M, NG A Y, JORDAN M I, et al. Latent Dirichlet allocation [J]. Journal of Machine Learning Research, 2012, 3: 993-1022.
- [14] THEKUMPARAMPIL K K, WANG Chong, OH S, et al. Attention-based graph neural network for semi-supervised learning [J]. arXiv preprint arXiv: 1803.03735, 2018.