

doi: 10.11720/wtyht.2017.3.25
肖都,李军峰.一种用于航空物探测量的无人机路径规划方法[J].物探与化探,2017,41(3):564-569.http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.3.25
Xiao D,Li J F.A path planning method of UAV for aerogeophysical survey[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2017,41(3):564-569.http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.3.25

一种用于航空物探测量的无人机路径规划方法

肖都,李军峰
(中国地质科学院 地球物理地球化学勘查研究所,河北 廊坊 065000)

摘 要: 笔者提出了一种三维路径自动规划方法,用于解决无人机在复杂地形条件下开展高精度航空物探测量所面临的自主导航问题。该方法以测网平面坐标及地表高程数据为输入,依据无人机的爬升率,对地表高程进行爬升率调整、切割线调整和抽稀拟合处理,得到匹配无人机爬升能力的高程曲面数据,进而提取出可以用于自主导航的航路点三维路径数据。仿真和试验测试结果表明,该方法规划的路径既保障了飞行安全,又具有一定的地形跟随效果,为无人机在复杂地形条件下获取高精度航空物探测量资料创造了有利条件。

关键词: 无人机;航空物探测量;路径规划;爬升率

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2017)03-0564-06

0 引言

无人机路径规划通常是指在综合考虑无人机到达时间、油耗、威胁以及飞行区域等因素的前提下,为无人机规划出最优或者满意的飞行路径,以保证其圆满地完成飞行任务并安全返回基地^[1]。为了实现无人机的智能自主飞行,要求路径规划系统在无人机起飞前,能够根据数字地图,结合不同的威胁因素以及无人机自身的约束条件离线规划出一条满足任务要求的最优参考路径^[2]。目前国内外学者提出了许多不同的无人机路径规划算法,规划决策一般可以分为传统经典算法和现代智能算法。传统经典算法包括数学归纳法、动态归纳法、最优控制法和导数相关法等;人工智能规划算法包括遗传算法、人工神经网络算法、蚁群算法以及模拟退火算法等^[3-5]。

航空物探测量与军用或其他民用路径规划的目标、内容和方式有显著区别。以航磁测量为例,航空物探路径规划通常按测量比例尺规定间距,垂直主要地质构造线或主要异常带走向平行布设测线,称主测线(简称测线);与主测线大致正交,用于联络

主测线磁场水平,并可检查主测线飞行质量的测线,称为切割线或联络线。由测线和切割线构成测网数据,指引飞行器严格遵循该测网数据生成的航路点进行飞行测量。为了获取高质量的测量资料,一般要求飞行器沿制定测线依地形超低空起伏飞行,因此,对于航空物探应用领域,无人机路径规划的重点和难点在于航高规划。

笔者针对无人机在复杂地形条件下开展高精度航空物探测量所面临的自主导航问题,研究根据平面测网数据和地表高程数据,结合不同的威胁因素以及无人机自身的约束条件,通过人工智能自动规划出每条测线满足任务要求的飞行高度的方法。

1 航高规划原则与思路

1.1 安全原则

在地形切割剧烈地区,无人机必须与地面保持足够的安全距离,才能有效地降低触地概率。由于无人机机动性能的限制,需要重点考虑飞行器的最大爬升(下滑角)和最大拐弯角,具体要求为:首先,沿测线方向以最大爬升角爬升或按最大下滑角下降时均能安全越障;其次,由于侧风等因素导致偏航

时,为了避免触地风险,无人机应处于安全走廊内;更高的安全措施是,当因航空管制或现故障需要立即返场时,无人机能够以任意方向安全退出,即要求无人机作业时处于一个安全飞行曲面上。航空物探无人机航高规划的首要任务是解决安全问题。

1.2 地形跟随

根据航空物探作业要求(例如航空磁测规范^[6]),航空物探测量应尽量选择低空性能好的无人机,原则上测线平均离地飞行高度的上限不应该超过主测线间距的 0.707 倍,以获取对目标体更高的测量分辨率;区域性、综合性和专属性矿产航空物探测量时,应采用随地形起伏飞行;油气航空磁测时,应采用缓起伏的低高度飞行;在水域上空测量飞行时,按实际允许的安全高度平飞。对于高精度航空物探测量,无人机航高规划的主要任务之一是实现依地形起伏飞行能力。

1.3 高精度测量

航空物探一般将测量总精度作为衡量测量质量的最为重要的一个技术指标(如航空磁测总精度)。除系统动态噪声、导航定位误差、转向差、磁日变等因素以外,磁测总精度与飞行高度误差密切相关^[6]。磁测总精度采用计算切割线与测线交点上磁场差值之均方差 σ 来衡量:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \delta_i^2}, \tag{1}$$

其中: δ 为第 i 个切割线与测线交叉点上磁场差值; n 为参加计算的切割线与测线交叉点个数。该计算公式表明,如果切割线与测线在交叉点处的飞行高度一致,有利于提高测量总精度。从另一个角度来说明这个问题:当相邻测线离地高度差异较大时,往往会导致测量数据等值线图中出现较严重的条带状干扰,一般通过各种调平手段去除,但调平会导致测量信息失真,总精度下降。因此,无人机应在一个连续的曲面上飞行,主测线和切割线在交点处的飞行高度应具有一致性,且高度剖面均应为平滑曲线。

1.4 飞行高度获取

航空物探测量中的飞行高度有两种表示方法:
①海拔飞行高度(又称绝对飞行高度)是指飞机飞行时距海平面的高度,通常用 GPS 或气压高度计获取海拔高度数据;
②离地飞行高度(又称为相对飞行高度),是指飞机飞行时距正下方地表面的距离,通常多用雷达或激光测高仪获取离地高度数据。在平原、丘陵等地形变化较为平缓的地区,飞行器一般采用雷达高度来指引飞行高度,从而实现地形跟随能力。在高山区,由于地形切割剧烈,加之离地高度

往往会出现超出雷达高度计量程的情况,此时通常采用气压高度计来获取高度数据。对于复杂地形(如高山地区)的航空物探测量,无人机航高规划的对象是海拔飞行高度。

1.5 航路点控制

具备全自主飞行能力的无人机一般采用导航文件实现飞行轨迹控制。导航文件由一组航路点组成,每个航路点包括经纬度、海拔高度数据及离地高度数据等数据项。在地势平坦的地区,只需输入两个端点的控制高度,无人机就可在测线上依地形起伏飞行;在地形复杂的高山区,显然需要插入多个航路点来控制飞行高度以保障飞行安全。为保证飞控系统的高可靠性,通常航路点存储器容量是有限的,不能简单地将测线上高密度测点的三维数据全部导入到存储器内,这成为无人机超低空自主导航面临的一个难点问题。

1.6 航高规划思路

根据以上原则,笔者制定了一种航高规划的人工智能方法。该方法的思想类似于二维曲面滤波^[7-8],即将切割剧烈、峰谷尖锐的地表曲面调整为较为平缓的、能够满足安全性和高精度测量需求的飞行曲面,再根据测网坐标数据从该曲面提取三维路径,通过抽稀拟合的方法获得密度合适的航路点三维数据,用于复杂地形条件下的无人机全自主飞行导航,其方法流程参见图 1、图 2。

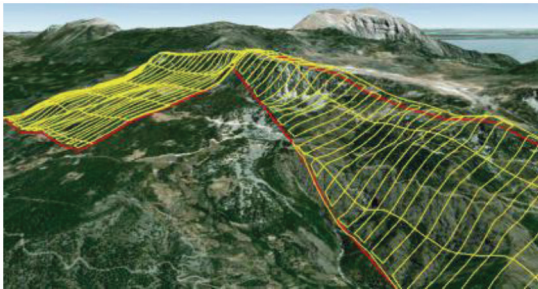


图 1 航空物探路径规划示意

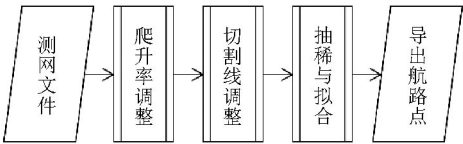


图 2 无人机路径规划方法流程

测网文件:根据测量比例尺设计测线,并从地表高程数据中提取测线上测点的高程,形成测网文件。由主测线的测线号和测点数据包组成,测点数据包由经纬度、直角坐标(x,y)和地表高程数据组成。

爬升率调整:根据安全原则,依据无人机的爬升

率或下滑率,将起伏剧烈的测线高程剖面进行一维调整,得到起伏平缓的高程剖面。

切割线调整:根据高精度测量原则,借鉴航磁数据处理中的伪切割线调平方法^[7],将爬升率调整后得到的地形剖面进行二维调整,得到起伏平缓的二维曲面。

抽稀与拟合:根据航路点控制原则,将二维曲面中提取的测点进行抽稀、拟合,得到密度合适的路径控制点数据。

导出航路点数据文件:将路径控制点数据根据飞行计划组成航路点数据文件,用于无人机自主导航。该文件包括测线号、点号、经纬度、直角坐标(x, y)、地表高程和飞行高度(海拔飞行高度)等数据项。

2 算法

2.1 爬升率调整

爬升率调整方法流程图参见图3所示。首先通过峰值检索得到测线地表高程剖面中的每一个峰值点,然后根据爬升率对峰值点的高度进行调整,确保由峰值点连成的高程曲线的每一段斜率都小于爬升率和下滑率,最后用插值的方法恢复原数据点密度,结果称之为爬升率一维调整高程数据。

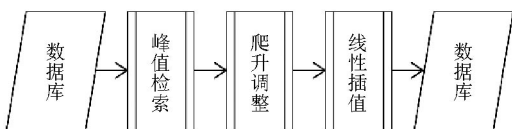


图3 爬升率调整方法流程

前人提出了多种峰值检索算法^[8-11],笔者采用LabVIEW提供的一种峰值检索方法^[12-13]来提高爬升率调整算法的速度。图4展示了爬升率调整的算法流程。 K_0 为爬升率(为简化问题,笔者假定无人机的爬升率和下滑率近似相等); $X[n]$ 为测点 n 距测线起点的长度; $Y[n]$ 为测点 n 的地表高程。当某两个测点连线的斜率绝对值大于爬升率时,依据图中列明的方法调整其中一个测点的高程数据。当所有相邻测点连线的斜率均不大于爬升率后,爬升率调整过程结束。爬升率调整可以有效降低地表高程的梯度,以保证无人机在该测线沿地形起伏飞行时能够安全越障。

2.2 切割线调整

虚拟切割线调平法是一种提高航测资料精度和图件质量的新的数据处理方法^[14-16]。该方法以误

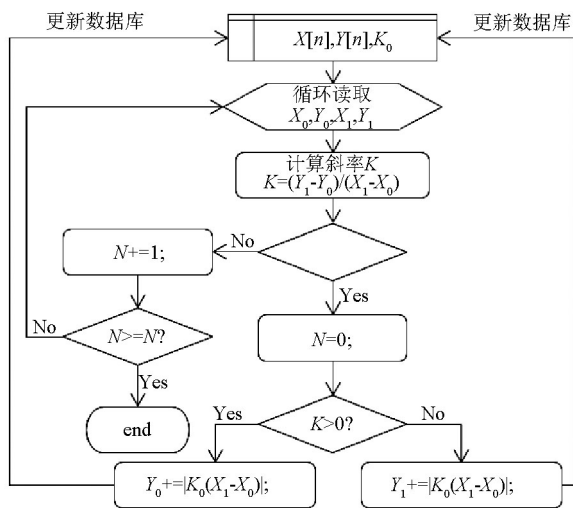


图4 爬升调整算法示意

差理论为基础,根据场的分布理论,利用多项式数据拟合对测量数据进行分析、处理,以便消除迭加在测量值中的系统误差,从而达到消去因误差引起的相邻测线间场的水平的不一致以及出现在等值图上的波纹现象的目的。笔者借鉴其技术思路提出了切割线调整方法,目的是抑制相邻测线间飞行高度的突变,使切割线和主测线在交叉点上的高度能够保持一致,调整方法流程如图5所示。首先从爬升率一维调整后的主测线数据库中提取伪切割线,然后对伪切割线进行爬升率调整,切割线爬升调整后的交叉点高程数据再插入到主测线中覆盖原数据,最后对主测线再做一次爬升率调整,得到二维调整后的地表高程数据。

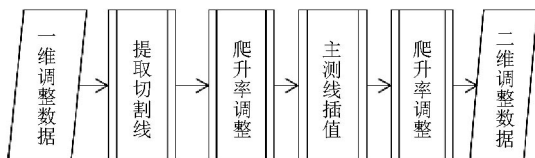


图5 切割线调整方法流程

切割线调整的关键是伪切割线提取,其算法简述如下:两个端点坐标分别为 (x_0, y_0) 和 (x_1, y_1) 的第一条主测线作为基线,根据主测线和切割线相互垂直的关系,得到第一条切割线方程 $Ax + By + C_0 = 0$ 的系数 A, B 和 C_0 。

当 $x_0 = x_1$ 时, $A = 1, B = 0, C_0 = -x_1$;当 $y_0 = y_1$ 时, $A = 0, B = 1, C_0 = -y_1$;其他情况下, $A = -k, B = 1, C_0 = kx_0 - y_0$;其中 $k = (y_1 - y_0) / (x_1 - x_0)$ 。

第 i 条切割线的方程为 $Ax + By + C_i = 0$,相邻两条切割线的距离为 D ,则系数 C_i 可由下式决定: $C_i = C_0 \pm (i \times D) \sqrt{A^2 + B^2}$, $C_0 < 0$ 时取负号。

从每一条主测线坐标数据中搜索 d 值最小的点

组成切割线,完成切割线测点提取。 d 值可表达为:
 $d=|(Ax+By+C_i)|/\sqrt{A^2+B^2}$ 。

2.3 抽稀与拟合

地表高程数据通过二维调整后,需要再进行抽稀与拟合处理,以产生密度合适的航路点飞行控制文件。抽稀的方法是将多个相邻的数据用一个线段表示。例如分辨率为 50 m 的 DEM 数据,通过每 5 000 m 输出一个航路点,可将控制点密度缩减 100 倍,以解决存储量受限的问题。如图 6 处理结果所示,首先通过循环调用广义最小二乘法使多点组成的曲线数据拟合为一条线段: $f=ax+b$; x 是输入序列 X , a 是斜率, b 是截距。然后对该线段做截距调节,使所有的点位于线段的下方,最后用线段的两个端点作为航路点去控制该区段的飞行高度,从而完成抽稀与拟合步骤。

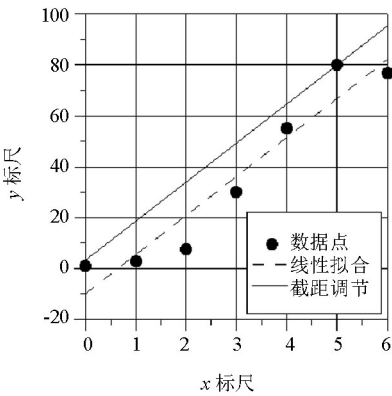


图 6 线性拟合实例

3 仿真实例

为实现复杂地形条件下无人机航空物探系统飞行高度的自动规划,基于图形语言开发环境 LabVIEW 和笔者提出的航高规划方法,开发了无人机航空物探路径自动规划软件。该软件根据国产彩虹三无人机的飞控系统硬件及飞行控制策略的特点,以及航空物探测量依地形起伏飞行的要求,以测网

数据及地形数据为输入,依据无人机的爬升率,对主测线和切割线的地表高程进行调整,将地形切割剧烈的测网地形调整为能够保证无人机安全飞行的曲面,通过测网坐标在该曲面上提取飞行高度数据,从而形成适于无人机航空物探飞行的三维路径规划数据。

以塔里木盆地西南部无人机航磁调查应用为例,利用上述软件对笔者提出的高山区无人机航空物探三维路径规划方法进行了仿真验证。图 7~9 展示了测线 L270 航高规划仿真结果数据剖面,横坐标为飞行距离,纵坐标为海拔高度。测线 L270 是测区中一条南北向主测线,海拔高度跨度很大(1 300~4 800 m),地表切割较为剧烈,无人机在这样的地形条件下无法依据雷达高度数据飞行,且无人机的爬升率较低,不具备安全越障的条件。为了解决该问题,笔者提出了一种依据海报高度数据指导飞行的方法,该方法的关键是获得符合无人机爬升性能的地表高程剖面数据。

第一步是爬升率调整,即通过一种特殊的一维滤波方法,提取出地表高程数据的低频成份。图 7 对比了 L270 测线地表高程剖面 and 不同爬升率调整后的高程剖面。爬升率 0.04 表示飞行距离 100 m,无人机可以爬高 4 m。横坐标为飞行距离,纵坐标为海拔高度。可以看出一维调整后的高程剖面近似地表高程的包络线,爬升率设置越大,地形跟随性能越好,爬升率设置越小,安全性越高。

第二步是二维切割线调整,以解决相邻测线间地表高程突变的问题,确保无人机飞行时具备一个较宽的安全走廊。图 8 为同一测线经切割线二维调整后的高程剖面,可以看出该主测线在 4 180 000 m 至 4 250 000 m 之间的高程受邻近测线高程影响改变明显。

第三部是抽稀与拟合处理,以产生密度合适的航路点飞行控制文件。图 9 对比了 4 条高程剖面,分别是地表高程数据剖面、爬升率调整后的高程剖面、抽稀拟合处理后的高程剖面、飞行高度调整后的

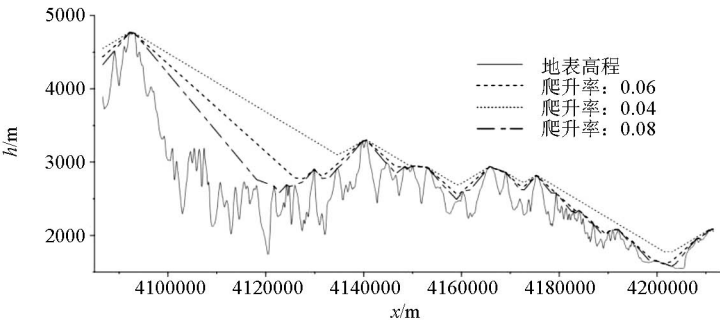


图 7 不同爬升率调整仿真结果

稀拟合处理后的高程数据加上最低离地高度得到的、最终的飞控高程数据。

由图 9 可知,如果无人机沿着飞控高程数据剖面飞行,可以获得一定的依地形起伏飞行的效果;同

时,高程梯度小于无人机的爬升率,提高了安全越障性能;另外,无人机使用气压高度(海拔高度)数据控制无人机飞行高度,解决了该地形条件下无法使用雷达高度的问题。

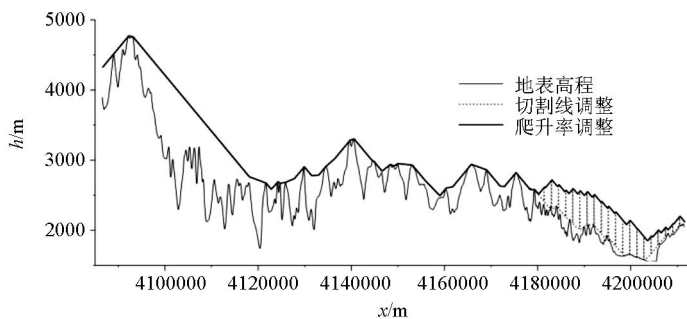


图 8 二维调整仿真结果

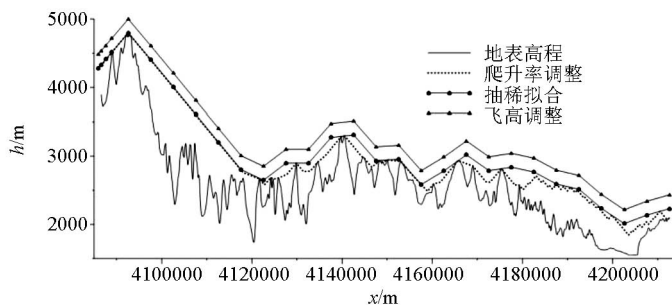


图 9 抽稀与拟合仿真结果

4 结论

随着我国无人机航空物探测量技术的逐步完善^[17],无人机的应用范围迅速由平原、丘陵地区向山区及复杂地形区域扩展。为了满足应用需求,笔者针对复杂地形条件下无人机航空物探测量面临的航高规划问题,提出了一种基于爬升率调整的地形调整方法,能够有效弱化地形的剧烈变化,从而得到在正交方向上匹配无人机爬升率的高程曲面数据。在为无人机提供安全飞行曲面的同时,使其具备了一定的地形跟随能力,从而为高精度航空物探测量创造有利条件。此外,笔者提出了航路点抽稀与拟合方法,为航路点存储量有限的无人机提供了有效的解决方案。除了适用于地形复杂的高山区外,该方法也适用于解决人文干扰地区的路径规划问题。方法的有效性在“塔里木盆地无人机航磁油气勘查”项目生产实践中已经得以验证。

需要说明的问题包括:其一,该方法不是真正意义上的二维算法,但只要测网密度足够大,就能够满足实际需求;其二,笔者为简化问题,假设无人机的下滑率和爬升率相等,实践中可区别对待以提高精

度;其三,笔者未考虑风速等气候因素,为保证安全,离地飞行高度需要考虑一定的安全裕度。

参考文献:

- [1] 唐强,张翔伦,左玲.无人机路径规划算法的初步研究[J].航空计算技术,2003,33(1):125-128.
- [2] 王俊,周树道,朱国涛,等.无人机路径规划常用算法[J].火力与指挥控制,2012,37(8):5-8.
- [3] 胡中华,赵敏,姚敏,等.无人机路径规划技术研究与发展趋势[J].航空电子技术,2009,40(2):24-29.
- [4] 康乐.无人机三维路径规划方法研究[J].计算机工程与应用,2009,45(33):236-239.
- [5] 黄书捷.无人机在高原山地环境下航摄轨迹的规划[J].城市勘测,2016,2(1):53-57.
- [6] DZ/T 0142-2010.航空磁测技术规范[S].中华人民共和国国土资源部.
- [7] 汪沛,王岩飞,张冰尘,等.基于局部条纹频率估计的二维高斯滤波方法[J].武汉大学学报:信息科学版,2007,32(10):868-871.
- [8] 伍鹏,贺振华,陈学华,等.二维高斯迭代平滑滤波曲率属性及其应用[J].地球物理学进展,2010(6):2144-2149.
- [9] 陈坤,田孝华,赵颖辉,等.塔康包络检测与方位估计算法研究[J].光电与控制,2014,21(4):92-96.
- [10] 姚瞬,刘海龙,陈传平,等.一种获取锋电位的峰值检测算法的改进方案[J].生物医学工程研究,2005,24(1):14-17.

[11] 张爱华,王平,丑永新.基于动态差分阈值的脉搏信号峰值检测算法[J].吉林大学学报,2014,44(3):847-853.

[12] 田铁. 基于 LabVIEW 的正弦波信号峰值捕捉程序模块设计[J]. 机械管理开发,2010, 25(1): 179-181.

[13] 邹建,雷铁鸣. 基于虚拟仪器的获取 CCD 波形峰值的研究[J]. 中国测试技术, 2007, 33(5): 98-101.

[14] Huang H P,Douglas C F. Airborne resistivity data leveling [J]. Geophysics,1999, 64(2):378.

[15] 李文杰.用于频率域航空看那个电磁数据的二维自动调平[J].成都理工大学学报,2007, 34(4):447.

[16] 孙东明,王卫平,曾昭发,等.用于频率域航电数据处理的伪切割线自动调平法[J].物探与化探,2010,34(2):246-249.

[17] 李军峰,李文杰,等. 新型无人机航磁系统在多宝山矿区的应用试验[J].物探与化探,2014,38(4):846-850.

A path planning method of UAV for aerogeophysical survey

XIAO Du,LI Jun-Feng

(Institute of Geophysical and Geochemical Exploration,CAGS,Langfang 065000,China)

Abstract: This paper presents a three-dimensional automatic path planning method, which is used to solve the problem of autonomous navigation of UAV (Unmanned Aerial Vehicle) under the condition of complex topography in high-precision aerogeophysical survey. With the survey path coordinates and DEM (Digital Elevation Model) data as the input, on the basis of climb rate of the UAV, and by the climbing rate adjustment, cutting line adjustment, rarefying and fitting processing, this method get the matching surface elevation data with the UAV climbing capability, and it could be used to extract 3D path data for autonomous navigation. Simulation and test results show that the path data acquired by this method not only guarantee the flight safety but also have certain terrain following effects, thus creating favorable conditions for high precision aerogeophysical survey with UAV.

Key words: UAV;Aerogeophysical survey;path planning;rate of climb

(本文编辑:王萌)