

基于暗通道的单幅图像快速去雾算法

张驰宇 贾银亮 梁康武

(南京航空航天大学自动化学院 南京 211106)

摘要: 为了提高雾天环境下退化图像的视觉效果,以大气退化模型和暗通道先验估计为基础,提出了一种快速单幅图像去雾算法。利用暗通道先验对大气透射率进行粗估计,用采样边缘保持滤波细化透射率,再设法估计出原图中的天空区域,对其进行透射率补偿,根据估计的大气光和透射率,利用大气退化模型即可恢复出无雾图像。针对去雾后的图像色度较暗的问题,使用一种自适应直方图均衡方法。实验结果表明,相对于已有算法,该算法有效提高了图像去雾的效果,而且加快了处理速度。

关键词: 暗通道先验;边缘保持滤波;透射率补偿;直方图均衡

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Fast defogging algorithm for single image based on dark channel

Zhang Chiyu Jia Yinliang Liang Kangwu

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: In order to improve the visual effect of degraded images in foggy environment, a fast dehazing algorithm for single image is proposed based on the degradation model and the dark channel prior estimate. Using dark channel prior estimates the atmospheric transmittance roughly, then using edge preserving filtering estimates the refinement of transmittance, after that try to estimate the sky region in the original image for compensating of the transmission of the region. Finally, according to the estimated atmospheric light and transmissivity, the fog image can be recovered by the atmospheric degradation model. In order to solve the problem that the color of the image is darker, the adaptive histogram equalization method is used. The experimental results show that compared with the existing algorithms, the proposed algorithm can effectively improve the effect of image fogging and speed up the processing speed.

Keywords: dark channel prior; edge preserving filtering; compensate of the transmission; histogram equalization

0 引言

在雾、霾等气候条件下,空气中会存在大量悬浮颗粒,这些悬浮颗粒会影响光线在空气中的传播,造成光线的散射和吸收^[1],摄像系统生成的图像会产生视觉上的退化,例如图像模糊不清、对比度降低,尤其是对于彩色图像。降质图像在实际应用中影响很大,如公路上的监控无法看清车辆的具体信息^[2],飞行员无法看清机场跑道、航站楼的具体情况,因此,图像去雾越来越成为一个研究的热门,许多研究机构都展开了相应的研究。

现有的图像去雾方法主要有两大类:一类是多幅图像增加约束:采用多幅同一场景图像的方法(多偏振滤波图像)以及基于深度图^[3]的方法。前者实际操作有难度,同一场景中不同对象的偏振特性不同,因而适用性较差;后者使用灵活,一般图像景深越深,退化程度越严重^[4],但需要给

定深度信息,这在实际工程中不一定满足。

另一类是基于单幅图像的去雾方法,这一方面在近年取得了巨大发展。文献[5]中,Tan等人提出晴天图像的对比度要高于降质图像这一先验知识,利用马尔可夫随机场模型(Markov random field, MRF)框架,采用最大化局部对比度来进行降质图像清晰化处理。该算法没有从大气光退化模型上恢复出真实场景的反射率,因此会出现结果图像颜色过饱和,还会在一些景深边缘产生 Halo 效应。文献[6]中,Fattal等人使用物体表面阴影局部不相关的假设来估计场景的反射率,然后使用 MRF 模型来估计得出清晰图像。该算法基于数理统计,其处理效果受输入图像信息的影响很大,在浓雾天气或者光线暗淡的情况下,信息不足,图像处理失真较大。文献[7]中,Tarel等人基于暗通道局部均值和局部方差提出一种中值滤波的快速清晰化算法,但中值滤波本身存在不保边、不保角的缺陷,导致获得

的大气散射光虽然比较平滑,但与场景深度信息并不完全吻合,在图像景深突变的区域容易产生 Halo 效应。文献[8]中,He 等人统计大量户外清晰图像得出了暗通道先验规律,暗通道先验去雾算法基于其先验规律直接得出雾的浓度以及图像透射率;对于块状效应和景物边缘,利用软件抠图的方法进行细化;最后根据大气物理模型恢复出清晰图像。后来,He 等人又提出了指导滤波^[9]用以代替软件抠图,减少算法复杂度。He 的算法处理大多数带雾图像有着良好的效果,但对天空区域处理效果不佳。

综上所述,本文在 He 的算法基础上,使用一种采样原理的边缘保持滤波方法优化透射率,再对天空部分进行透射率补偿,最后针对去雾后的图像看起来较暗的问题,提高其对比度,获得良好的视觉效果。

1 相关工作

1.1 基本模型

在计算机视觉和数字图像处理领域,描述雾天图像的基本大气物理模型是:

$$I(x) = J(x)t(x) + A(1 - t(x)) \quad (1)$$

式中: x 代表图像中各个像素的位置, $I(x)$ 是带雾图像; $J(x)$ 是希望恢复出的无雾原图; $t(x)$ 是传输衰减函数,表示物体反射光线在雾中的透射率; A 是大气光亮度, $A(1 - t(x))$ 代表大气光成分经过衰减后对图像的影响,也是要去除的干扰。

经过数学变换可得:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A \quad (2)$$

式中: t_0 是一个常数,用来限制最小透射率,避免某些点因为透射率太低成为噪声点,He 的算法中, $t_0 = 0.1$ 。在式(2)中,只要得出 A 和 $t(x)$ 的值就可以通过数学变换得到无雾的原图像,图像去雾的核心就围绕这两者的最优值展开。

1.2 暗通道先验原理

暗通道原理是基于大量无雾户外图像获得的一种统计规律,即在正常非天空局部区域里,域内存在某个像素在至少一个颜色通道上亮度值很低,接近于 0。对带雾图像在 $n \times n$ 区域内做 3 个通道的最小值滤波,即

$$J^{dark}(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} \left(\min_{y \in \Omega(x)} (J^c(y)) \right) \rightarrow 0 \quad (3)$$

式中: c 是一个像素的一个颜色通道, $\Omega(x)$ 是带雾图像上以 x 像素为中心 $n \times n$ 的方形区域,最终得到的 J^{dark} 就是暗通道图。

为了求透射率 $t(x)$,假设 A 已知且 $\Omega(x)$ 中各像素透射率相同。在式(1)中,等式两边同时除以 A ,再对两边同时取最小值变换,根据式(3)的理论,得到

$$\tilde{t}(x) = 1 - \min_{c \in \{r, g, b\}} \left(\min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{I^c(y)}{A^c} \right) \right) \quad (4)$$

在实际运用中,为了体现深度信息,需引入深度系数 w ($0 < w < 1$),即

$$\tilde{t}(x) = 1 - \omega \min_{c \in \{r, g, b\}} \left(\min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{I^c(y)}{A^c} \right) \right) \quad (5)$$

因为在 He 方法中,默认透射率在 $\Omega(x)$ 中相同,这样求得的透射率图存在方块效应,在景深突变的边缘也会出现白边效应,He 等人采用软件抠图和指导滤波的方法得到细化后的透射率图。

1.3 大气光估计

He 提出了暗通道先验理论来估计 A 。具体方法:1) 挑选出暗通道图中前 0.1% 的最亮像素;2) 在带雾图片中取出与 1) 中像素位置相同的像素;3) 取 2) 中像素它们的最高亮度值作为大气光 A 。这种方法兼顾了最亮像素和暗通道先验规律,比单纯的“最亮像素法”更具有鲁棒性。

1.4 暗通道先验算法的局限性

在大多数情况下,He 的算法都是一种行之有效的去雾算法,但也有其局限性。He 的算法中,细化透射率需要巨大的计算量,处理一幅 800×600 的带雾图像,用软件抠图法一幅往往需要数分钟,即使使用指导滤波,也需要 10~20 s,所以细化透射率的效率需要提高。

由暗通道先验的原理可知,天空区域和大面积白色物体并不符合这个先验规律,图像中灰白高亮区域会被误认为透射率很低,而被过度去雾,形成色彩失真。可以从数学上解释这一问题,将式(1)改写为:

$$A - J(x) = \frac{A - I(x)}{t(x)} \quad (6)$$

假设 $(A - I(x)) \in (0, 30)$, $t(x) = 0.2$, 则 $J(x)$ 在区间 $(A - 150, A)$ 之间变化,这一点与天空部分颜色较明亮且平滑这一特点相违背,容易出现去雾后颜色失真;而且天空图像中存在诸如鸟类的其他物体,这种操作也会在这些物体周围产生噪声。

此外还可以发现用 He 算法去雾处理后的图片看起来较暗,不符合一般的视觉习惯。本文就是要在处理效率、天空补偿、视觉效果这 3 个方面进行改进提高。

2 本文算法改进

针对以上分析,本文对 He 的算法进行 3 个方面的改进:1) 找到一种计算量较小的方法细化透射率,代替指导滤波;2) 提出一种简单可靠的方法补偿天空区域的透射率;3) 找到一种合适的方法调整去雾后图像的色度。

2.1 透射率细化

He 提出的软件抠图法和指导滤波对透射率都有良好的细化效果,所以本文主要是在效果相差不大的前提下减少细化操作计算量。文献[10]使用一种边缘约束的方法结合正则化背景来优化场景的透射率,文献[11]基于暗通道先验估计,对图像边缘和非边缘采用不同的模板处理得到透射率。本文使用的方法是在指导滤波的基础上,通过对输入图像和指导图像采样^[12]来减少计算量,所以将其称为采样边缘保持滤波。

指导滤波的基本线性模型为:

$$q_i = a_k I_i + b_k, \forall i \in \omega_k \quad (7)$$

式中: I 是指导图像, 一般是原图像, q 是最后的输出图像, 也就是细化后的透射率图。 i 代表图像内各个像素, k 代表半径为 r 的局部矩形窗口 ω 内的各个像素的集合。用待细化的透射率图 p 作为输入图像, 为了最小化 p, q 之间的重构误差:

$$a_k = \frac{\frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} I_i p_i - \mu_k \bar{p}_k}{\sigma_k^2 \delta + \epsilon} \quad (8)$$

$$b_k = \bar{p}_k - a_k \mu_k \quad (9)$$

两式中, μ_k 和 σ_k 分别是图像 I 在窗口 ω 中亮度值的均值和方差。 ϵ 是用来控制平滑度的正则化参数, 一般取一个定值, 矩形窗口 ω 的半径 r 不宜太大也不宜太小, 太小指导滤波效果不明显, 太大会放大图像中的纹理。最终的表达式为:

$$q_i = \bar{a}_i I_i + \bar{b}_i \quad (10)$$

式中: \bar{a}_i 和 \bar{b}_i 分别是以 i 像素为中心的窗口 ω_i 内 a_i 和 b_i 的均值。

综上, 式(10)中的 \bar{a} 和 \bar{b} 都是两幅光滑的映射图, 所以输出图像 q 的结构和边缘都来自于指导图像 I 。计算过程中绝大多数的计算量都是在解算 \bar{a} 和 \bar{b} 的映射图, 但这一过程并不一定要在全分辨率的情况下进行。基于这种原理, 本文使用一种采样的方法。

首先, 在 p 和 I 图像中以比例 s 进行采样, 可以根据最近邻域法或者线性法则。滤波器中对 a 和 b 的解算都在采样之后低分辨率的环境下进行, 这样可以大大减少计算量。然后, 将两映射图 \bar{a} 和 \bar{b} 根据双线性插值法, 恢复到原图像的大小。最后, 在式(10)过程中, 指导图像 I 使用全分辨率图像, 这样可以保持原图像的边缘和结构。实验证明, 此方法细化透射率在效果区别不大的情况下, 速度有着成倍的提高。

2.2 天空区域补偿

对于天空区域和大面积白色物体, 容易被误认为透射率很低, 所以补偿的主要任务是适当的增加其透射率^[13]。文献[14]使用图像亮度阈值和梯度阈值来判定天空区域, 将天空部分的透射率统一确定为 0.4; 文献[15]引入了天空隶属系数来调整对应像素位置的透射率, 以此抑制天空区域噪声和 Halo 效应。

本文主要使用亮度阈值来判定天空区域, 根据像素的亮度确定对应的补偿系数, 具体的实现过程如下:

$$K = (A - \text{mean}(I))/3 \quad (11)$$

$$k = \begin{cases} 1, & |\text{mean}(x) - A| > K \\ \frac{K}{|\text{mean}(x) - A|}, & |\text{mean}(x) - A| \leq K \end{cases} \quad (12)$$

$$T(x) = \min(k \cdot t(x), 1) \quad (13)$$

在式(11)中, $\text{mean}(I)$ 是图像 I 所有点灰度的均值, 图像灰度的均值代表这幅图亮度的平均水平, $(A - \text{mean}(I))$ 代表一幅图像亮度与大气光差值的平均水平, 本文通过观察大量雾天的图片发现将 $(A - \text{mean}(I))/3$ 作为判断阈值

比较合理, 最终将 K 作为透射率是否补偿的判断标准。

在式(12)中, $\text{mean}(x)$ 是一个像素三通道亮度值的均值, 当一个像素的亮度均值与大气光的差值小于等于 K 时, 可以认为这个像素属于天空或者接近天空区域, 需要对此像素的透射率进行补偿, 再根据此点 $\text{mean}(I(x))$ 的大小确定补偿系数 k 。

在式(13)中, $T(x)$ 是补偿得到的透射率, 根据透射率的物理意义, 其最大值为 1。

该方法可以大致判断出需要补偿的区域, 且对不同亮度值的区域采用不同的补偿率, 可以在一定程度上处理含有大面积灰白高亮区域的带雾图像, 同时没有脱离暗通道的原理, 而且此补偿消耗的计算量不多, 增加运算时间不明显。

2.3 色度调整

对于去雾后的图像色度较暗的问题, 本文使用一种对比度有限的自适应直方图均衡算法 CLAHE 方法来做最后调整。

对于一幅图像而言, 不同的区域对比度的差别可能很大, 有些地方很明亮, 有些地方比较暗淡, 如果采用全局的直方图均衡算法调整其对比度显然不能适应所有的情况。文献[16]基于分块处理的思路提出自适应直方图均衡算法 AHE, AHE 方法对每个像素的变换函数来自于此像素的邻域, 因此这种算法有时会将某些噪声放大。

文献[17]引入了 CLAHE 方法, 利用一个对比度阈值来去除噪声的影响。具体步骤如下:

1) 将经过透射率补偿的图像 $I_{x,y}$ 作为 CLAHE 方法的输入图像, 把 $I_{x,y}$ 分割成大小相同互不重叠的子窗口;

2) 得到每个子窗口的灰度直方图;

3) 计算对应子窗口的直方图限制阈值 β , 计算公式来自文献[18]

$$\beta = \frac{M}{N} \left(1 + \frac{\alpha}{100} (S_{\max} - 1) \right) \quad (14)$$

式中: M 是子窗口的像素总数, N 为对应子窗口的灰度级, S_{\max} 被称为最大斜率, α 是限制系数;

4) 根据 β 值对子窗口的直方图进行裁剪, 再将被裁剪下来的像素重新分配到子窗口的直方图中, 对重新分配的子窗口再进行直方图均衡化;

5) 对每个子窗口建立灰度映射函数, 用双线性插值法求出各像素灰度值。

对于 CLAHE 方法, α 是一个重要的可变参数, 决定了图像均衡后的视觉效果。在原先算法中, α 的默认值为 0.4, 这个默认值对于去雾显然不合适, 会导致图像严重失真, 本文对限制系数 α 进行了优化。

在天空透射率优化的步骤里, 当一幅图片中需要优化透射率的像素超过总像素的 30%, 就认为这幅图片含有大量天空区域, 这类图片使用一个限制系数 α_1 , 反之, 另一类图片使用另一个限制系数 α_2 , α_1 和 α_2 可以通过若干实验确定。这种确定 α 的方法比原算法中给出的默认值更科学, 图片处理后的效果也更符合人们的视觉习惯。

本文使用 CLAHE 方法提高了图像去雾后的色度,获得了更好的视觉效果,这个图像增强的过程适合用于最后的调节。

3 实验结果分析

为了验证本文算法的有效性,对大量带雾图像进行的去雾实验,并与 He 算法和 Tarel 算法对比。实验平台为惠普 PC,处理器为 Intel(R) Core(TM) i3-4150 3.5 GHz CPU,内存 8 G,软件平台为 MATLAB 2013a。实验中的参数设置如下:计算暗通道时,方形区域 $\Omega(x)$ 尺寸取 15×15 ,深度系数 ω 取 0.9;采样边缘保持滤波器的半径 r 取 60,正则化参数 ϵ 取 0.01,采样的比例 s 取 4。

3.1 去雾效果分析

对于无大范围天空图像,如图 1 所示,He 算法整体效果较好,但图像颜色偏暗,不符合我们的视觉习惯;Tarel 算法克服了 He 算法的缺点,图像较为明亮,但在景深突变的一些边缘区域,出现了不正常的白色区域,还有江水的处理效果不尽如人意;反观本文算法,图像景物清晰,色彩鲜明自然,符合人们的视觉习惯。

对于含大范围天空图像,如图 2 所示,He 算法在山花图片的天空中出现了光晕,故宫图片天空中出现了光晕还

有块状效应,这是由于图片的天空中存在杂质,去雾处理放大了这些噪声,同时去雾后两幅图片颜色都较暗;Tarel 算法在山花图片中对景物的处理较好,但天空严重失真,在故宫图片中,去雾不彻底,图片处理后依旧覆盖一层薄雾;反观本文算法,山花图片景物的处理不输于 Tarel,景物后方树林边缘的处理要优于 Tarel,同时天空部分透射率得到优化,没有出现光晕,故宫图片中通过优化透射率消除了天空杂质的影响,展现了天空原来的颜色,故宫景物清晰,色彩自然,取得了良好的效果。

3.2 时间复杂度分析

对于 He 算法的主要计算过程指导滤波来说,处理一幅 $M \times N$ 像素的图像,其时间复杂度为 $O(M \times N)$,本文使用的采样边缘保持滤波复杂度为 $O((M \times N)/S^2)$,实验时,取 S 为 4,这样在细化透射率过程,就降低了十几倍的复杂度。本文虽然还有天空透射率补偿和色度调整的步骤,但处理时间反而有所减少。

对于 Tarel 算法,处理一幅 $M \times N$ 像素的图片,其时间复杂度为 $O(M \times N \times Sv^2 \times InSv)$,在 MATLAB 实验中设 $Sv = 2 \text{ floor}(\max(\text{size}(I))/50) + 1$, I 是输入图像,由此可以看出 Tarel 算法在复杂度上处于很大的劣势,下面通过实验证明的时间复杂度理论分析。



图 1 无大范围天空图像

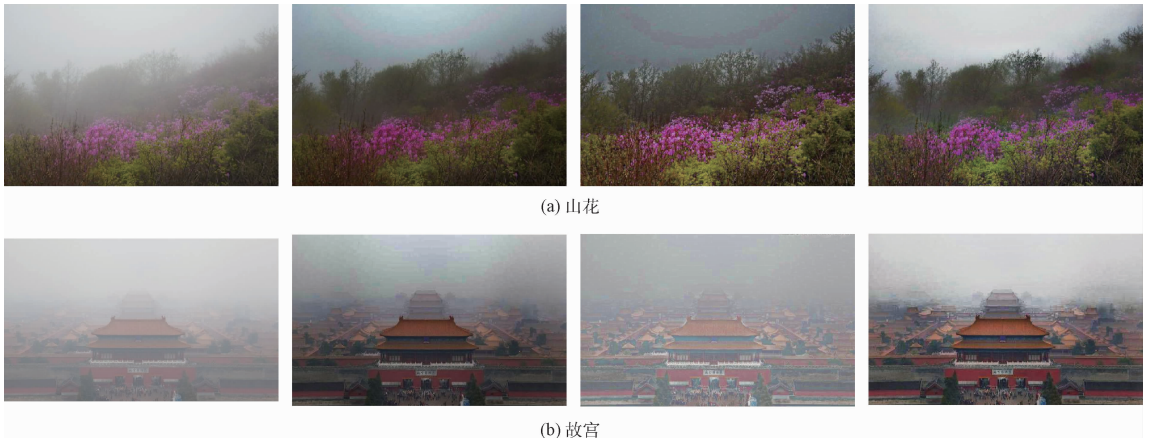


图 2 含大范围天空图像

表1 各算法运行时间 (s)

图像	He算法	Tarel算法	本文算法
1(a)	8.49	29.86	6.45
1(b)	7.51	62.66	5.33
1(c)	5.29	9.48	4.18
1(d)	4.42	4.73	3.08

5 结 论

本文提出一种基于暗通道先验的快速单幅图像去雾算法。首先通过暗通道算法获得原始透射率图,再使用一种采样边缘保持滤波细化透射率,减少算法计算量,然后对大面积的天空进行透射率补偿,很好的消除了其因过度去雾引起的色彩失真,最后使用自适应直方图均衡算法CLAHE解决了图像色度较暗的问题。实验证明,本文算法得到的去雾图像有着良好的清晰度和可视性,对于包含天空区域和白色物体的带雾图像也有较好的处理效果,并且实现了速度的提升。利用更多的信息来分区天空区域,提高透射率补偿的效果是以后一个很有价值的研究方向。

参考文献

- [1] 楚广生,宋玉龙,李祥琛,等. 基于SCMOS的近红外雾成像系统[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(S1): 138-141.
- [2] 顾明,郑林涛,尤政. 基于颜色空间转换的交通图像增强算法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(8): 1901-1907.
- [3] AHN J, YASUKAWA S, SONODA T, et al. Image enhancement and compression of deep-sea floor image for acoustic transmission[C]. Oceans. 2016:1-6.
- [4] 张新龙,汪荣贵,张璇,等. 基于视觉区域划分的雾天图像清晰化方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(8): 754-762.
- [5] TAN R. Visibility in bad weather from a single image [C]. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Alaska, America: IEEE, 2008:2201-2208.
- [6] FATTAL R. Single image dehazing [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 1-9.
- [7] TAREL J P. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision, Kyoto, Japan: IEEE, 2009: 2012-2208.
- [8] HE K, SUN J, TANG X. Single image haze removal

using dark channel prior[C]. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Florida, America: IEEE, 2009: 1956-1963.

- [9] HE K, SUN J, TANG X. Guided image filtering[J]. Proceedings of IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [10] MENG G, WANG Y, DUAN J, et al. Efficient image dehazing with boundary constraint and contextual regularization [C]. IEEE International Conference on Computer Vision, IEEE, 2013: 617-624.
- [11] 褚宏莉,李元祥,周则明,等. 基于黑色通道的图像快速去雾优化算法[J]. 电子学报, 2013, 41(4): 791-797.
- [12] ZHANG Q, LI X. Fast image dehazing using guided filter [C]. IEEE 16th International Conference on Communication Technology, 2015: 182-185.
- [13] 石林玉,谢维成,蒋文波,等. 变压器套管油位雾霾图像检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(6): 854-861.
- [14] 李加元,胡庆武,艾明耀,等. 结合天空识别和暗通道原理的图像去雾[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(4): 514-519.
- [15] 顾浩,王敬东,孙震,等. 暗原先验算法在天空区域的处理与改进[J]. 电子测量技术, 2016, 39(7): 96-99.
- [16] XUAN J, MONPERRUS M. Test case purification for improving fault localization[C]. Proceedings of the 22nd ACM SIGSOFT international Symposium on Foundations of Software Engineering, 2014: 52-63.
- [17] HE W, WU Q, LI S. Medical X-Ray image enhancement based on wavelet domain homomorphic filter and CLAHE[C]. International Conference on Robots & Intelligent System, 2016: 249-254.
- [18] WEN W. Software fault localization based on program slicing spectrum[C]. Proceedings of the 34th International Conference on Software Engineering, 2012: 1511-1514.

作者简介

张驰宇, 1993年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为图像去雾算法和FPGA设计等。

E-mail: 76091515@qq.com