一种基于三角形重投影的虚拟视角合成

张春晓 赵 剡

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院,北京 100191)

摘 要: 相比较传统的视角插值合成方法只能在基线上合成虚拟图像,提出的一种基于三角形重投影的虚拟视角合成方法,可以在已知少数几个匹配点的情况下,将场景内容自动迭代划分为一致和非一致三角形区域,通过不同策略的三角形重投影实现更加自由的视点的虚拟图像合成. 划分过程中引入直线段约束可以解决直线纹理在三角形接缝处的畸变问题,保证最后的合成图像中场景表示在此处的连续性. 利用设计的可信度函数,沿一定搜索路径可找到更多的新匹配点,从而带来更多的一致三角形区域. 将此方法应用到虚拟彩色图像的合成,实验结果证明了此方法可以在更大视点范围内合成逼近于真实图的虚拟图像.

关 键 词: 虚拟图像合成; 三角形重投影; 直线段约束; 匹配点

中图分类号: TP 391

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)01-0086-05

Virtual view synthesis based on triangular re-projection

Zhang Chunxiao Zhao Yan

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Traditional view interpolation can only synthesize the novel view along the base line. The proposed method based on triangular re-projection can iteratively divide the scene into consistent and inconsistent triangles given a few of initial matches, and implement free-viewpoint view synthesis by re-projecting these two groups of triangles in different strategies. The straight line constraint was introduced to direct the division along the line in order to reduce the discontinuity nearby the common side of two adjacent triangles. The new matching points were confirmed by the designed evaluation function in a special searching order. They were detected in the inconsistent regions for further division to produce more and more consistent regions. The color-image experiment proves that this method is effective to synthesize a photo-realistic image under wider changes in viewpoint.

Key words: virtual view synthesis; triangular re-projection; straight line; matching points

虚拟视角合成(VVS,Virtual View Synthesis)做为虚拟导航的关键环节,是一个从场景的高层描述重建图像的过程. 这里直接使用观测图像而非计算机图形学中 3D 几何模型信息合成复杂场景在指定虚拟视点下的图像,使其尽可能地逼真于场景在该点的真实投影图像. VVS 需要根据在观测图像上已知的像素点强度通过一定映射关系确定新视角上对应点的强度. 对于虚拟导航这种要在多个不同视角进行合成的情况,相比较将坐标系统定义在合成图像上的后向映射,将坐标系统定位在观测图某帧上的前向映射避免了因坐标系变化带来的数据更新和重复性计算,更利于实时进行[1-2].

传统的视角插值方法,对视差量的线性插值可以保证在基线上合成图的正确投影[3]. 而对利用深度信息的重构的 3D 元素进行重投影则可以

收稿日期: 2010-09-14; **网络出版时间**: 2012-01-06 15:10; **DOI**: CNKI:11-2625/V.20120106.1510.009

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120106.1510.009.html

基金项目: 中国留学基金委资助项目

作者简介: 张春晓(1984 -),女,山东兖州人,博士生,cxzhang84@gmail.com.

实现在更大视点范围的视角合成. 当深度信息未知时,可以沿深度方向搜索,通过投影的相似性度量找到准确的 3D 量[4]. 3D 量重投影可以是对点的操作,也可以是对区域的操作. 相比较基于分割的不规则区域,完全依赖于顶点的规则区域更易操作,灵活性更大[5-6]. 文献[5]提出了一种 2D/3D 混合三角形场景表示的方法,分别用于表示场景中均可见的一致区和因为遮挡引起可见性变化的冲突区,在图像绘制时区别对待两种区域,可有效处理大视角变化带来的投影畸变和遮挡现象. 本文基于此思想,针对划分所需新匹配点的确定和三角形的进一步约束划分提出新的思路,从而保证了场景表示在三角形接缝处的连续性和更多一致性区域的产生.

1　算　法

由 3 幅已进行了摄像机标定的观测图,采用混合 2D/3D 三角形场景表示法,通过重投影这些三角形合成新视角虚拟图的具体步骤如下:

1) 利用 Harris 角点检测找到最稳定的初始匹配点,对这些数量十分有限的匹配点进行 Delaunay 三角划分,得到在 3 幅图中对应的三角形对(τ_1,τ_2,τ_3),其中 τ_i 是第 i 幅图中的三角形,然后逐一进行一致性检测;

2) 一致性检测包括顶点顺序的一致和相似性度量. 为了保证宽基线时对投影畸变的鲁棒性,相似性度量对比的是 τ_1 经单应矩阵变换(式(1))后的结果与 τ_2 的纹理差异. 此变换假设了场景是分段平滑的,通过一致性检测的三角形对可以认为是同一部分平面场景的投影,没通过的需要执行 3)继续划分,直到最后只剩余因可见性变化不一致的区域;

3) 在保证已通过一致性检测的区域不变的前提下进行不一致三角形的继续划分. 为了保证在三角形接缝处纹理的连续性,这里引入直线段约束,具体步骤见 2. 1. 对没有直线段穿过三角形的情况,需要插入新的匹配点继续划分,匹配点的选择见 2. 2;

4) 按照一定的顺序实现三角形的重投影并设计合理的融合策略. 根据不一致度由大到小的顺序,先进行不一致区域的投影,然后进行一致区域的投影. 重投影就是把图像 C_i 中的 τ_i 通过式(1)变换到虚拟图像 C_j:

$$\boldsymbol{H}_{ij}=\boldsymbol{K}\boldsymbol{R}_j^{-1}(\boldsymbol{I}+\boldsymbol{T}_j\tilde{\boldsymbol{\pi}}^{\mathrm{T}})(\boldsymbol{I}+\boldsymbol{T}_i\tilde{\boldsymbol{\pi}}^{\mathrm{T}})^{-1}\boldsymbol{R}_i\boldsymbol{K}^{-1}\quad(1)$$

式中,$\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵;$\boldsymbol{K}$ 为摄像机的内参矩阵;$\boldsymbol{R}_i$ 和 $\boldsymbol{T}_i$ 为 C_i 相对固定参考坐标 C_1 的旋转和平移矩阵,若 $\bar{X}_i$ 是空间点在参考坐标系 C_i 下的坐标,则满足 $\bar{X}_1=\boldsymbol{R}_i\bar{X}_i+\boldsymbol{T}_i$;$\tilde{\boldsymbol{\pi}}^{\mathrm{T}}=[a,b,c]$ 为由三角形的 3 个顶点对应的空间点确定的平面方程 $aX+bY+cZ+1=0$ 的系数决定的.

设计合理的加权策略以更好的融合来自 3 个图像的三角形,以正确解决遮挡问题,减少重绘图中的鬼影,具体方案可见文献[5];

5) 将上述方法推广到彩色图像, 首先将观测图由 RGB(红、绿、兰)颜色空间转换到 YPbPr 颜色空间,原来的灰度量由亮度 Y 和 2 个色差量 Pb,Pr 组成的向量代替,在相似性度量中,用向量差的范数代替灰度差.

2　约束三角划分和新匹配点的引入

2.1　直线段约束三角划分

如果不引入直线约束进行划分,当一个直线段穿越两个相邻三角形时, 直线段在合成图的两个三角形公共边附近会出现断折的情况,因此对常见人造环境的虚拟视角合成引入直线段约束三角形划分,可以尽可能减少这种纹理的参差不齐. 具体操作如下:

1) 三角形对($\triangle ABC$, $\triangle A'B'C'$, $\triangle A''B''C''$)中,利用 Hough 变换计算此三角形中及附近区域的直线段,找到最长的线段所在的端点 F 和 G(如图 1),此时三角形 $\triangle ABC$ 被分割成三角形 $\triangle CFG$ 和四边形 $ABGF$;

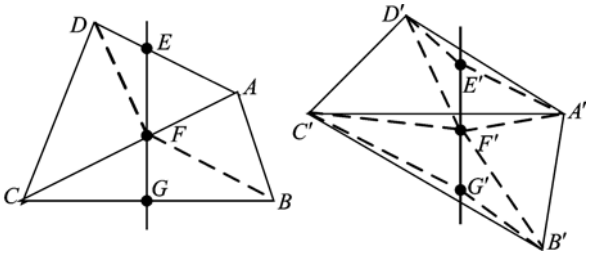


图 1　直线段约束三角划分的示意图

2) 在另外两个三角形 $\triangle A'B'C'$ 和 $\triangle A''B''C''$ 及邻近区域利用 Hough 变换得到直线向量集合 $\{\boldsymbol{l}_2\}$和$\{\boldsymbol{l}_3\}$,并且根据各直线段两侧亮度变化情况缩小候选集合,利用极线约束找到可能的匹配直线,公式为[7]

$$\boldsymbol{l}_3=(\tilde{\boldsymbol{m}}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}_{31}\tilde{\boldsymbol{e}}_{32})\boldsymbol{F}_{13}\tilde{\boldsymbol{m}}_1'-(\tilde{\boldsymbol{m}}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}_{32}\tilde{\boldsymbol{e}}_{31})\boldsymbol{F}_{23}\tilde{\boldsymbol{m}}_2'\quad(2)$$

式中,$\boldsymbol{F}_{ij}$为从 C_i 到 C_j 的基本矩阵;$\tilde{\boldsymbol{e}}_{ij}$为 C_j 在第 i 图中的投影极点;$\tilde{\boldsymbol{m}}$ 为 $\boldsymbol{l}_1$ 上的点的齐次坐标表示;$\tilde{\boldsymbol{m}}'$和 $\tilde{\boldsymbol{m}}''$分别为 $\tilde{\boldsymbol{m}}$ 在 $\boldsymbol{l}_2$ 和 $\boldsymbol{l}_3$ 上的对应点. 具体实施如下:$\tilde{\boldsymbol{m}}_1$ 和 $\tilde{\boldsymbol{m}}_2$ 在第 2 幅图中的极线与 $\boldsymbol{l}_2$ 相交于 $\tilde{\boldsymbol{m}}_1'$和 $\tilde{\boldsymbol{m}}_2'$,代入式(2),可以求得直线向量 $\boldsymbol{l}_3$,

在{$\boldsymbol{l}_3$}的集合中如果包含此向量,则说明它们是可能的匹配直线,将它们放入候选直线匹配集;

3) 确定匹配直线. 通过计算直线两侧区域的相关值判定匹配度,为了增强对视角变化引起的投影变换的鲁棒性,区域经 u-参数单应矩阵变换后再计算相关值[8]. 为了进一步剔除伪匹配,利用匹配的对称性要求交换 $\boldsymbol{l}_2$ 和 $\boldsymbol{l}_3$ 的位置,依然能找到同一匹配,即互为最优匹配. 由于存在着一幅图中多个直线段对应另一幅中一个直线段的情况,在使用匹配的唯一性之前,要对这些直线段进行合并,最后得到匹配线.

尽管已经找到了匹配直线,由于直线检测误差的存在,直接利用极线和匹配直线相交并不能得到 F 和 G 的准确对应点,为此将直线段拓宽几个像素构成带状区域,在极线的约束下挑选出相似度最高的点作为匹配点;

4) 四边形 $ABGF$ 的划分有两种分割,分别是连接 FB 和 AG,计算两种情况下三角形对的不一致像素的数量,从而选择对一致性更有改观的那种划分.

计算两个三角形 τ_i 和 τ_j 差异的步骤是:τ_i 经过 $\boldsymbol{H}_{ij}$ 变换到 τ'_i,τ_j 与 τ'_i 进行差分得到差值区域,利用 Ostu 方法二值化该区域得到差异像素的个数,进一步可以用分割法找到最大差异块,限制新引入匹配点的搜索分布区域在最大差异块以保证新的划分可以带来最大程度的一致性改观.

2.2 新匹配点的引入

对于引入直线段约束划分后依旧是非一致的三角形区域,需要引入新的匹配点进一步划分. 首先要在三角形对(τ_1,τ_2,τ_3)中选择一个三角形,在其中找到特征点,然后按照一定的顺序和几何约束确定在另外两幅图中的对应点. 为了尽可能减少误匹配,这里设计了一个匹配可信度函数,当此函数达到最大值时,匹配点的可信度很高.

2.2.1 特征点的选择

先对 τ_1,τ_2,τ_3 两两进行比较,选出差异最大的一对,然后在此对中找到所含边界点个数最多的一个 τ_i. 在此三角形中选择特征点需满足以下条件:①边缘上的点. 为保证在边缘获得特征点,不能使用基于区域的特征点匹配方法;②显著点,也就是由引入此点带来的分割能获取更多的一致区域,所以它要在面积最大的差异区域进行挑选(见 2.1 节 4));③ 强梯度响应. 把最大差异区进行等大小块状划分,从每块中选择其中梯度幅值最大的边缘像素,按梯度幅值由大到小将它们排列起来,构成特征点集{$\boldsymbol{m}_i$}.

2.2.2 相应匹配点的确定

利用极线约束可以将 2D 搜索转变到 1D 直线搜索,如图 2 所示. 沿着极线可以找到 $\boldsymbol{m}_1$ 的对应点列{$\boldsymbol{m}_2$}和{$\boldsymbol{m}_3$},构造可信度函数式为

$$f(\boldsymbol{m}_1,\boldsymbol{m}_2^i)=\begin{cases}\dfrac{[\operatorname{cor}(\boldsymbol{m}_1,\boldsymbol{m}_2^i)+1]}{2}\left[1-\dfrac{k\sum\limits_{S_k\in\tilde{S}}N_{S_k}(\boldsymbol{m}_1,\boldsymbol{m}_2^i)}{\sum\limits_{S_j\in S}N_{S_j}}\right] & \sum\limits_{S_j\in S}N_{S_j}>k\sum\limits_{S_k\in\tilde{S}}N_{S_k}(\boldsymbol{m}_1,\boldsymbol{m}_2^i)\\ 0 & \text{其它}\end{cases} \tag{3}$$

式中,$\boldsymbol{m}_2^i$ 为{$\boldsymbol{m}_2$}中的元素;cor(·)为相关窗口(图2 方框所示)内像素值的互相关函数(取值范围[-1,1]),为了减少对视角投影变化的依赖,这里的窗口搜索是在 τ_2 和经过单应矩阵变换的 τ_1 中进行的;S 和 $\tilde{S}$ 分别为假设引入匹配点 $\boldsymbol{m}_1$ 和 $\boldsymbol{m}_2^i$ 前后所影响的三角形对集合;N_{S_j} 为三角形对 S_j 彼此之间的差异像素的个数;k 为一个常数. 若 k 取 1,表示只有当新引入的划分带来比原来少的差异像素时,才有一定的可信度,但在划分的初期也存在一些特殊情况,即使正确划分也可能暂时不能带来更多的一致区域. 为了避免早熟,令划分继续下去,此时可以设定 k 为小于 1 的数. 可信度达到最高的点即为匹配候选点,它在第 3 幅图中的对应点可以通过 3D 点的重投影方便地找到. 计算此点的相关值或可信度,如果过低则剔除此匹配候选点,从特征点集中选择下一个进行同样的操作,直到找到符合要求的匹配点.

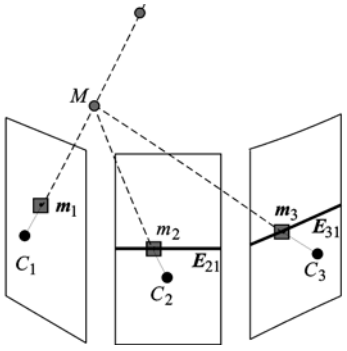


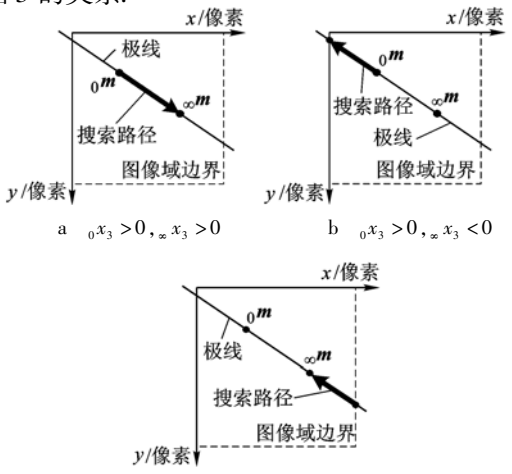
图 2 沿极线搜索匹配点的示意图

此外,沿极线按照一定的方向进行搜索,也有助于减少误匹配的发生. 搜索方向始于${}_0\boldsymbol{m}$,终于${}_\infty\boldsymbol{m}$,定义如下[9]:

$${}_0\boldsymbol{m}_2=\boldsymbol{P}_2(C_1-C_2)\qquad {}_\infty\boldsymbol{m}_2=\boldsymbol{P}_2\boldsymbol{P}_1^{-1}\boldsymbol{m}_1$$

式中,$\boldsymbol{P}_1$ 和 $\boldsymbol{P}_2$ 为摄像机的投影矩阵;${}_0\boldsymbol{m}_2$ 为 C_1 在图像 2 中的极点;${}_\infty\boldsymbol{m}_2$ 为无穷远处的空间点在图

像 2 中的投影. 对于平面图,搜索方向和路径由${}_0\boldsymbol{m}$和${}_\infty\boldsymbol{m}$的第 3 个元素 x_3 的正负性决定,存在图 3 的关系.



a　${}_0x_3>0,{}_\infty x_3>0$　　b　${}_0x_3>0,{}_\infty x_3<0$

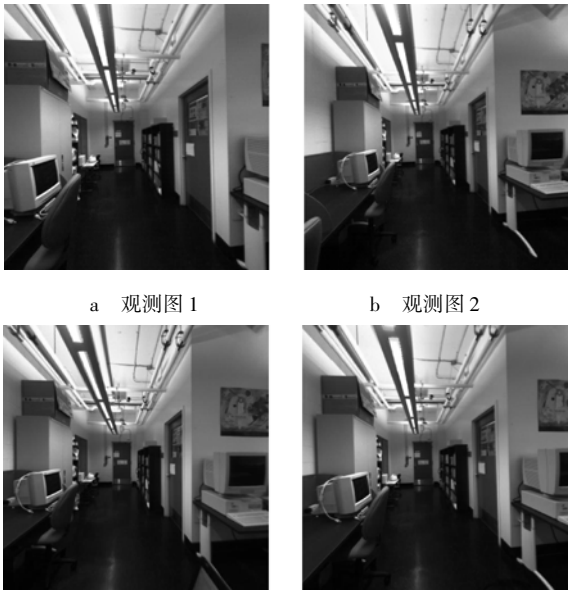
c　${}_0x_3<0,{}_\infty x_3>0$

图 3　在不同条件下,搜索路径与搜索方向示意图

为了进一步减少误匹配对合成图像的影响,最后在绘制时,要将相邻的非一致三角形合并,并且消除内部点,只保留不一致区域外轮廓的顶点,而这些顶点也是一致区域的轮廓点,可靠性很高;内部原有的匹配点由于存在遮挡等复杂情况,可靠性低,已被删除,这样即使存在误匹配也不会对最后的合成结果有致命的影响.

3　实验结果与分析

由 3 幅观测图(图 4a ~ 图 4c)合成图 4d 所在位置(非基线上的点)的虚拟视角. 以观测图 4a 为例,利用 Harris 角点检测得到了稳定的若干个初始匹配点进行 Delaunay 初始划分,如图 5a,



a　观测图 1　　b　观测图 2

c　观测图 3　　d　预合成的真实图

图 4　实验观测图



a　观测图 1 的初始划分　　b　引入直线段约束划分

c　观测图 1 中引入匹配点　　d　观测图 2 中引入匹配点

e　观测图 3 中引入匹配点　　f　引入匹配点后的划分

g　初始划分重投影的虚拟视角　　h　最后合成的虚拟视角

图 5　彩色图像虚拟合成实验结果

图 5b 显示了进行直线段约束划分后的结果,图 5c ~ 图 5e 是第 1 次迭代后在非一致三角形区域找到的新匹配点,可以看到误匹配率很低,证明了可信度函数的合理性. 图 5f 是引入这些匹配点后的划分,进行几次迭代后,就可以得到一致的和非一致的三角形集合,将它们进行重投影,将相邻的不一致三角形合并,最后分别将一致三角形集合和非一致区域按照文献[5]给出的合成策略重投影到新视角,合成结果如图 5h 所示. 相比较由未经直线约束和新匹配点引入的初始分割得到的合成图(图 5g 所示)相比,合成图 5h 的清晰度、真实感和准确性都有了显著提高. 此外进行直线段约束划分已经很好地消除了在三角形接缝处纹理的参差不齐.

4 结 论

本文设计了一种基于三角形重投影的虚拟视角合成方法,该方法只需少数的几个匹配点就可以自动进行划分,从而在有效时间内实现对更加自由的视点逼近于真实的虚拟图像合成. 实验结果表明:通过引入直线段约束划分保证了直线纹理在三角形接缝处的连续性;同时按照一定搜索顺序确定的匹配点也验证了可信度函数设计的合理性. 通过多次迭代后,对一致三角形和非一致三角形采用不同的重投影策略就可以合成指定视点的虚拟图像,而不再受传统视角插值方法只能在基线上进行图像合成的限制.

致谢 感谢 Eric. Dubois 教授对本文工作的指导.

参考文献 (References)

[1] Ince S, Konrad J. Occlusion-aware view interpolation[J]. EURASIP Journal on Image and Video Processing (Special Issue on 3D Image and Video Processing), 2008, Article ID 803231, 1 – 15

[2] Rogmans S, Lu Jiangbo. Real-time stereo-based view synthesis algorithms: a unified framework and evaluation on commodity GPUs [J]. Signal processing: Image Communicati-on, 2009, 24(1-2): 49 – 64

[3] Seitz S M, Dyer C R. Physically-valid view synthesis by image interpolation[R]. Proc Workshop on Representations of Visual Scenes, 081867122X, 1995

[4] Shi Feng, Laganiere R, Dubois E. On the use of ray-tracing for viewpoint interpolation in panoramic imagery[C]//Ferrie F. 2009 Canadian Conference on Computer and Robot Vision. Washington DC: IEEE Computer Society, 2009: 200 – 207

[5] Siu A M K, Lau R W H. Image registration for image-based rendering[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(2): 241 – 251

[6] Ukita N, Kawata S, Ukita M K. IBR-based free-viewpoint imaging of a complex scene using few cameras[C]//Borgefors G, Flynn P. International Conference on Pattern Recognition. Washington DC: IEEE Computer Society, 2008: 1 – 4

[7] Faugeras O, Luc R. What can two images tell us about a third one? [J]. International Journal of Computer Vision, 1996, 18(1): 5 – 19

[8] Schmid C, Zisserman A. The geometry and matching of lines and curves over multiple views [J]. International Journal of Computer Vision, 2000, 40(3): 199 – 233

[9] McMillan L. A list-priority rendering algorithm for redisplaying projected surfaces [R]. UNC-Chapel Hill Computer Science Technical Report, 95-005, 1995

(编 辑:刘登敏)

(上接第 16 页)

[2] 姚小虎,韩强,刘晓明,等. 微爆索切割航空有机玻璃的研究[J]. 航空学报,2006,27(1):152 – 156
Yao Xiaohu, Han Qiang, Liu Xiaoming, et al. Study on micro-detonation chord cutting of aviation polymethyl methacrylate[J]. Acat Aeronautic et Astronautica Sinica, 2006, 27(1): 152 – 156 (in Chinese)

[3] 李志强,刘晓明,赵勇刚,等. 微爆索线性切割航空有机的实验研究和有限元分析[J]. 爆破与冲击,2009,27(5):385 – 389
Li Zhiqiang, Liu Xiaoming, Zhao Yonggang, et al. Experimental study and finite elemental analysis of linear cutting aerial PMMA using micro detonantion cord[J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 27 (5): 385 – 389 (in Chinese)

[4] 赵茂隆,李志强. 爆炸力学在航空弹射救生系统中的应用[M]. 北京:兵器工业出版社,2009:80 – 100
Zhao Maolong, Li Zhiqiang. The application of explosive dynamic in aeronautics crew escape systems[M]. Beijing: Weapons Industry Press, 2009: 80 – 100 (in Chinese)

[5] 王志华,李志强,任会兰,等. 有机玻璃的几何形扰对爆炸切割影响的研究[J]. 高压物理学报,2010,24(1):43 – 47
Wang Zhihua, Li Zhiqiang, Ren Huilan, et al. Finite element analysis on the influence of PMMA geometry on explosion cutting [J]. Chinese Journal of High Press Physics, 2010, 24(1): 43 – 47 (in Chinese)

[6] McGill T A. Emergency escape from commercial aircraft [C]// 39th annual SAFE symposium. [S. l.]: SAFE, 2001: 120 – 130

[7] 寿荣中,何慧珊. 飞行器环境控制[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2004:57 – 58
Shou Rongzhong, He Huishan. Environment control of aircraft [M]. Beijing: Beihang University Press, 2004: 57 – 58 (in Chinese)

[8] 张立藩. 航空生理学[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1989:45 – 50
Zhang Lifan. Aeronautics physiology[M]. Xi'an: Shanxi Science Technology Press, 1989: 45 – 50 (in Chinese)

(编 辑:李 晶)