

景像匹配辅助导航系统中的图像匹配算法研究

熊 智 刘建业 曾庆化 赖际舟

(南京航空航天大学导航研究中心, 南京 210016)

摘 要 图像匹配算法是景像匹配辅助导航系统的核心,而且其性能决定了系统的总体性能,为了提高景像匹配辅助导航系统导航的实时性和精度,就必须选用合适的图像匹配算法,为此,给出了一种快速有效的基于图像特征的图像匹配算法,该算法选用部分 Hausdorff 距离作为图像匹配时的相似性度量,并利用图像特征提取后的二值化图像进行图像匹配,同时在联合了3种图像匹配加速技术的基础上,将邻域技术引入到图像匹配搜索终止条件中,从而大大提高了图像匹配效率。仿真结果表明,该算法可以保证图像匹配的鲁棒性和有效性,同时,能有效克服图像噪声和几何畸变的影响。该算法实施景像匹配能够在5s以内完成,并与GPS输出周期(1s)相当,可以满足景像匹配辅助导航系统匹配导航的准确性和实时性的性能要求。

关键词 景像匹配辅助导航系统 部分 Hausdorff 距离 图像匹配 图像特征

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2004)01-0029-06

The Study of Image Matching Algorithm for Scene Matching Aided Navigation System

XIONG Zhi, LIU Jian-ye, ZENG Qing-hua, LAI Ji-zhou

(Navigation Research Center, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract The images matching algorithm is the core of the scene matching aided navigation system, whose performance decides the total performance of the system. In order to improve the navigation accuracy and real-time performance of the scene matching aided navigation system, the choice of images matching algorithm must be suitable. The paper has given a quick and effective images matching algorithm based on image features, which has chosen the part Hausdorff distance as the similarity measuring, and utilized the binary images acquired by the image features abstraction to match images, and simultaneous introduced the neighborhood technology to the searching termination condition of images matching based on the combination of three kinds of images matching speed technology, which has improved the effective of the images matching greatly. The results of simulation show that the algorithm can prove the robustness and validity of the images matching and overcome the effect of noises and geometric distortions. The scene matching based on the algorithm can finish within five seconds, which is equivalent to the global position system output frequency (one second). So it can meet the accuracy and real-time performance needs for matching navigation in the scene matching aided navigation system.

Keywords Scene matching aided navigation system, Part Hausdorff distance, Images matching, Image features

1 引言

景像匹配辅助导航系统是一种利用机载高分辨率雷达或光电图像传感器实时获取地面景物图像,然后与机载计算机中预先存储的二维景像数字地图相比较,用于确定出飞行器位置的计算机导航系统。由于图像匹配定位的精度很高,因此可以利用这种

精确的位置信息来消除惯导系统长时间工作的累计误差,以便大大提高惯导系统的定位精度^[1,2]。

由于实时获取的景物图像和数字地图是通过不同的传感器在不同的时间获得的,其图像的灰度值差别很大,甚至相反,因此,这两种图像之间的匹配为非相似匹配,必须采用基于特征的图像匹配算法,才能获得较好的匹配效果;同时,由于成像过程中存在噪声和几何畸变,致使由此获取的图像特征必然存在差

异,因此,选用的图像匹配算法还必须具有一定的容错和抗干扰能力^[1]。为此,本文选用部分 Hausdorff 距离作为图像匹配时的相似性度量,并在此基础上给出了一种快速有效的图像匹配算法,该算法用部分 Hausdorff 距离作为匹配相似性度量可以保证匹配的鲁棒性和有效性,同时,可有效克服图像噪声和几何畸变的影响^[3,4]。由于部分 Hausdorff 距离是定义在图像边缘特征二值图像上的,因此,本文中提到的图像均是指图像特征提取后的二值化图像。

2 部分 Hausdorff 距离与图像匹配

Hausdorff 距离是一种定义于两个点集上的最大最小距离(max-min)^[5],若给定有限的两个点集 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_p\}$, $B = \{b_1, b_2, \dots, b_q\}$,则 A 和 B 的 Hausdorff 距离定义为

$$H(A, B) = \max(h(A, B), h(B, A))$$

其中, $h(A, B) = \max_{a \in A} \min_{b \in B} \|a - b\|$,称为 A 到 B 的有向 Hausdorff 距离; $h(B, A) = \max_{b \in B} \min_{a \in A} \|b - a\|$,称为 B 到 A 的有向 Hausdorff 距离。

$\|\cdot\|$ 为某种定义在点集 A 和 B 上的距离范数,本文使用的是欧几里德范数。

如果定义 $d_\beta = \min_{b \in B} \|\beta - b\|$, $\hat{d}_\beta = \min_{a \in A} \|\beta - a\|$ (β 表示空间中的任意点),则 Hausdorff 距离可定义为 $H(A, B) = \max(\max_{a \in A} d_a, \max_{b \in B} \hat{d}_b)$ 。本文称 d_β, \hat{d}_β 分别为点集 B 和点集 A 在空间中的变换距离。

由上述定义可以知道, $h(A, B)$ 为 A 中所有点到 B 中所有点最近距离的最大值,也就是说,当 $h(A, B) = d$ 时,则 A 集合中所有点与 B 集合的距离都不大于 d ,而且 A 集合中至少有一个点与 B 集合的距离为 d ,而这些点就是 A 集合与 B 集合之间的“最不匹配点”。可见, Hausdorff 距离表示了两个点集之间的最不相似程度。

由于 Hausdorff 距离是度量两个点集之间最不匹配点的距离,因此,它对远离中心的噪声点、漏检点都非常敏感,而这一点,在提取图像特征点集时是不可避免的。为了克服这个缺点,需要对 Hausdorff 距离的定义进行扩展,故本文给出了部分 Hausdorff 距离定义^[5],其只比较两个点集的部分点,而将其余点忽略。

点集 A 和 B 的部分 Hausdorff 距离定义如下:

$$H_{k,l}(A, B) = \max(h_k(A, B), h_l(B, A))$$

$$1 \leq k \leq p, 1 \leq l \leq q$$

其中, $h_k(A, B) = k_{a \in A}^{\text{th}} \min_{b \in B} \|a - b\|$ (th 表示按由小到大的顺序排序)称为 A 到 B 的有向部分 Hausdorff 距离,即将点集 A 中所有点到点集 B 的距离按由小到大的顺序排序,如果取其中序号为 k 的距离为 $h_k(A, B)$,则可以通过调整 k 的大小,将点集 A 的一个部分与点集 B 进行匹配,以便排除由噪声点和漏检点而引起的匹配影响。同理也可以计算出

$$h_l(B, A) = l_{a \in A}^{\text{th}} \max_{a \in A} \|b - a\|$$

由于部分 Hausdorff 距离 $H_{k,l}(A, B)$ 综合了 $h_k(A, B)$ 和 $h_l(B, A)$ 的信息,因此可以作为图像特征点集匹配的一个合理匹配准则来使用。

在进行图像特征点集匹配过程中,由于匹配的点是变化的,因此,不能采用固定的 k 和 l 值,而是采用两个百分数来确定,即

$$k = f_1 \times p, \quad l = f_2 \times q \quad 0 \leq f_1 \leq 1, 0 \leq f_2 \leq 1$$

如果将部分 Hausdorff 距离用于图像特征点集匹配,则匹配的目的就是力求在所有可能的变换空间中寻找图像特征点集之间的最优相似变换,以便通过使部分 Hausdorff 距离最小化来获得最优匹配结果。

设 g 为变换空间 T (通常由旋转变换矩阵 R 、平移变换向量 t 、尺度 c 等变换组成)中的一个变换,则最优匹配变换 g_0 满足 $M_{g_0}(A, B) = \min_{g \in T} H(A, gB)$ 。

3 基于部分 Hausdorff 距离的图像匹配加速技术研究

景像匹配辅助导航的目标就是将两个不同传感器从同一个景物录取下来的两幅图像在空间上进行对准,并确定出两幅图像之间相对平移与旋转的相似变换参数。由于景像匹配辅助导航系统需要实时向惯导系统提供精确的位置修正信息,因此,对图像匹配的准确性和实时性有比较严格的要求。考虑到景像匹配辅助导航的主要目的是提高导航系统的定位精度,由于只需要通过图像匹配来确定实测图在参考图中的位置坐标(平移点坐标)即可精确定位,因此,本文仅以平移变换为图像匹配时的具体研究对象。由于匹配位置的确定,必须通过逐一比较参考图上每一个平移点上的部分 Hausdorff 距离值,并从中选择由最小值所确定的平移点作为最终的匹配点,因此,如果不采用加速技术,则这种全局搜索方法就无法满足匹配实时性的要求。

为了加速图像匹配过程,在兼顾图像匹配的准

确性和实时性的基础上, 结合部分 Hausdorff 距离的性质, 给出了 3 种图像匹配加速技术, 以提高匹配效率^[5], 它们分别是邻域排除法、扫描终止法、前向跳跃法。由于本文研究的快速图像匹配算法需要联合利用这 3 种匹配加速技术, 因此, 下面将对这 3 种技术加以详细说明。

在图像匹配搜索过程中, 平移变换向量 t 可以利用直角坐标系内的二维坐标 (x, y) 来表示。若规定参考图像边缘特征二值图像为 A , 其尺寸为 $m_A \times n_A$, 实测图像边缘特征二值图像为 B , 其尺寸为 $m_B \times n_B$, 并规定特征点值为 1, 非特征点值为 0, 则可能的平移变换为 (x, y) , 其中, $-m_B + 1 \leq x \leq m_A - 1$, $-n_B + 1 \leq y \leq n_A - 1$ 。图像 A 和图像 B 的特征点数分别为 p 和 q 。设 τ 为图像匹配时给定的阈值。

规定在平移变换 (x, y) 的作用下, 图像 A 和 B 特征点集之间的双向部分 Hausdorff 距离定义为 $F(x, y) = \max\{F_A(x, y), F_B(x, y)\}$ 。

上式中, $F_A(x, y) = \max_{k, l: g_A(k, l) = 1} D_a(k - x, l - y)$, 称为在平移变换 (x, y) 作用下的 A 到 B 的有向部分 Hausdorff 距离; 同理

$$F_B(x, y) = \max_{k, l: g_B(k, l) = 1} \hat{D}_b(k + x, l + y)$$

称为在平移变换 (x, y) 作用下的 B 到 A 的有向部分 Hausdorff 距离。同理称 D_β, \hat{D}_β (β 表示二维空间内的任意点) 分别为图像 B 和图像 A 的特征点集在二维空间中的变换距离, 其中 $D_\beta = \min_{b \in B} \|\beta - b\|$, $\hat{D}_\beta = \min_{a \in A} \|\beta - a\|$, (a, b 分别表示了图像 A 和 B 中的特征点)。

3.1 邻域排除法

由于 $F_B(x, y)$ 具有变化速率小于线性变化的性质^[5], 即

$$|F_B(x_1, y_1) - F_B(x_2, y_2)| \leq \|(x_1, y_1) - (x_2, y_2)\|$$

因此, 若 $F_B(x_1, y_1) = v > \tau$, 则在以 (x_1, y_1) 为中心, 以 $R = v - \tau$ 为半径的圆内, 都有 $F_B(x, y) > \tau$, 依据这个性质, 就可以排除掉 (x_1, y_1) 附近的不匹配平移点。

3.2 扫描终止法

当图像 B 的特征点中有一个点, 在平移变换 (x, y) 作用下, 其 Hausdorff 距离大于 τ , 则可以判断在该平移变换下, $F(x, y) > \tau$, 这样由于可以停止其余特征点的计算, 从而可大大节省计算时间。

该方法可以推广到部分 Hausdorff 距离度量中, 定义 $l = f_2 \times q$ 。匹配时, 首先计算出边缘特征图像 A 的变换距离, 然后在给定平移变换 (x, y) 下, 对

与图像 B 具有同样大小尺寸的 $\hat{D}_\beta(x_b + x, y_b + y)$, $0 \leq x_b < m_B, 0 \leq y_b < n_B$ 进行统计, 并计算与图像 B 特征点相对应的, 且 $\hat{D}_\beta > \tau$ 的特征点个数, 当特征点个数大于 $q - l$ 时, 由于可以知道 $F_B(x, y) > \tau$, 从而可以不再需要计算其他特征点。

3.3 前向跳跃法

前向跳跃法是依靠顺序来扫描水平方向上所有可能的平移变换空间, 由于该方法在水平方向上可迅速排除掉较大部分不匹配的平移变换点, 从而可加快图像匹配搜索速度。

该方法步骤为: 给定一个平移变换点 (x, y) , 按照 x 的增量方向搜索 $\hat{D}_\beta(x, y)$ 小于给定阈值 τ 的其他平移变换点, 并计算出这些平移变换点与点 (x, y) 在水平方向上的距离, 同时定义 x 增量方向的变换距离 $\hat{D}_{+x}(x, y) = \min_{\Delta x \geq 0; \hat{D}_\beta(x + \Delta x, y) \leq \tau} \Delta x$, 由于 $\hat{D}_{+x}(x, y) \geq \hat{D}_\beta(x, y) - \tau$ 关系成立, 因此可以利用 $\hat{D}_{+x}(x, y)$ 来确定所有水平平移变换中 x 的最小增量值, 以便找到最靠近 (x, y) 的平移变换点, 而且使得 $F_B(x, y) \leq \tau$ 成立。

同时, 定义 $G_B(x, y) = l_{b \in B}^n \hat{D}_{+x}(x_b + x, y_b + y)$, $0 \leq x_b < m_B, 0 \leq y_b < n_B$, 当 $G_B(x, y) = 0$ 时, 则至少有 l 个 $\hat{D}_{+x}(x, y) = 0$, 由于至少有 l 个 $\hat{D}_\beta(x, y) \leq \tau$, 从而 $F_B(x, y) \leq \tau$ 成立; 相反, 当 $G_B(x, y) = \Delta x \geq 0$ 时, 则必有 $F_B(x, y) > \tau$ 成立, 由于同时有 $F_B(x + 1, y) > \tau, F_B(x + 2, y) > \tau, \dots, F_B(x + \Delta x - 1, y) > \tau$ 成立, 因此, 在 x 方向上就可以直接增加 Δx , 这样就可避开计算大量的不可能匹配的平移变换点。在实际使用过程中, 当计算 $G_B(x, y) = \Delta x \geq 0$ 时, 由于可以不用计算 $F_B(x, y)$, 从而大大节约了计算时间。

4 基于部分 Hausdorff 距离的图像匹配算法

通过上一节对 3 种图像匹配加速技术的原理分析可以看出, 这 3 种加速技术均能有效提高图像匹配效率^[5], 为此, 本文在联合这 3 种匹配加速技术的基础上, 给出了实现图像快速匹配的计算方法。本文还将邻域技术引入到匹配搜索终止条件中, 同时由于采用了 3-4DT 算法^[6]来进行图像特征点集在二维空间中的距离变换计算, 从而进一步提高了匹配效率。

给定参考图像边缘特征二值图像为 A , 实测图

边缘特征二值图像为 B , 匹配时, 首先定义两个百分数 $0 \leq f_1 \leq 1, 0 \leq f_2 \leq 1$, 并定义给定阈值 $\tau \geq 0$, 然后利用部分 Hausdorff 距离定义来确定平移变换 (x, y) , 使得 $F(x, y) = v \leq \tau$.

图像匹配算法的具体实现步骤如下:

(1) 计算图像 B 的特征点集在二维空间中的变换距离

$$D_{\beta}(x, y), 0 \leq x < m_B, 0 \leq y < n_B$$

(2) 计算图像 A 的特征点集在二维空间中的变换距离

$$\hat{D}_{\beta}(x, y), -m_B < x < m_A + m_B - 1, -n_B < y - n_A + n_B - 1$$

(3) 计算

$$\hat{D}_{+x}(x, y) = \min_{\substack{\Delta x \geq 0; D_{\beta}(x + \Delta x, y) \leq \tau \\ -n_B < y < n_A + n_B - 1}} \Delta x, -m_B < x < m_A + m_B - 1,$$

(4) 定义数组

$$M = \{M(x, y), -m_B < x < m_A + m_B - 1, -n_B < y < n_A + n_B - 1\}$$

并赋所有元素初值为 0;

(5) 定义 $k = f_1 \times p$ 表示计算部分 Hausdorff 距离过程中所考虑的图像 A 中与图像 B 相对应部分中的特征点个数; $l = f_2 \times q$ 表示计算部分 Hausdorff 距离所考虑的图像 B 中的特征点个数;

(6) 创建空的集合 T ;

(7) 对于每一个可能的平移变换点 (x, y) , 按图像 B 中像素的顺序从上到下、从左到右进行如下处理:

① 如果 $M(x, y) > \tau$, 则转向下一个平移变换点, 否则, 转入第 2 步;

② 定义 $n = 0$;

③ 对于每一个特征点 $b \in B$, 如果有 $\hat{D}_{+x}(x_b + x, y_b + y) > 0$ ((x_b, y_b) 表示图像 B 的特征点 b 在直角坐标系内的坐标), 则 n 增加 1; 如果在这个过程中, 出现 $n > q - 1$, 则进行如下处理: 1) 取 Δx 为 $\hat{D}_{+x}(x_b + x, y_b + y)$ 按从小到大顺序排列的第 l 个值; 2) 取 \hat{v} 为 \hat{D}_b 按从小到大的顺序排列的第 l 个值; 3) 计算以 (x, y) 为圆心, 以 $\|\hat{v} - \tau\|$ 为半径的范围内的所有点 (\hat{x}, \hat{y}) , 其数组中的 $M(\hat{x}, \hat{y}) = \max(M(\hat{x}, \hat{y}), \hat{v} - \|(x, y) - (\hat{x}, \hat{y})\|)$; 4) 转向下一个可能的平移变换点 $(x + \Delta x, y)$, 如果 $x + \Delta x > m_a$, 则转向下一行的开始;

④ 若 $n \leq q - 1$, 并令 \hat{v} 为 $\hat{D}_b(x_b + x, y_b + y)$ 按从小到大顺序排列的第 l 个值, 则有 $F_B(x, y) = \hat{v} \leq \tau$; 同时, 对于每一个特征点 $a \in A$, 计算

$$\max_{g_A(x_a, y_a) = 1} D_a(x_a - x, y_a - y), x \leq x_a < x + m_B, y \leq y_a < y + n_B$$

再按小到大的顺序排列, 并取第 k 个值为 v , 即 $F_A(x, y) = v$, 从而有 $F(x, y) = \max(v, \hat{v})$; 如果有 $v \leq \tau$, 则将 $((x, y), \max(v, \hat{v}))$ 增加到集合 T 中, 作为候选的匹配点;

⑤ 以获取的第 1 个候选匹配点为中心, 搜索以 τ 为半径的一个邻域, 再重复上述 ①~④ 步寻找候选匹配点, 并加入集合 T 中。当给定的邻域搜索完成后, 则转向第 8 步。

(8) 从集合 T 中寻找具有最小部分 Hausdorff 距离度量值的匹配点作为最终匹配点。

5 图像匹配仿真

为了验证本文算法的有效性, 还利用多幅真实图像进行了图像匹配仿真研究, 由于篇幅所限, 下面只给出两组实验结果。图像匹配算法采用 Visual C++ 6.0 语言编写, 在主频为赛扬 633、内存为 256M 的 PC 机上进行测试。测试过程中采用 Canny 算子作为图像特征提取算法^[7], 并通过将获取的特征进行二值化来获得参考图和实测图的边缘特征二值图像。在图像匹配过程中, 选取匹配参数为 $f_1 = 0.8$, $f_2 = 0.8, \tau = 3$ 。

由于在具体选取参考图像和实测图大小时, 必须依据景像匹配辅助导航系统对图像匹配的具体导航误差范围和对图像的实际分辨率大小要求来进行选择, 因此, 可以通过合理选择图像的大小和相应的分辨率, 以保证图像匹配算法满足景像匹配辅助导航系统对匹配的准确性和实时性的要求。本文以 GPS 的输出周期 (1 s) 为参考, 进行仿真研究。

在仿真实例 1 中选取参考图像大小为 160×160 像素, 实测图为 50×50 像素。为了方便分析, 本文将参考图像加上方差为 32 的高斯噪声, 并旋转 3° ; 然后在此图像上任意截取一个大小为 50×50 像素的区域作为实测图; 最后采用本文匹配算法进行匹配仿真研究。由于本文的重点在于利用图像的边缘特征二值图像来进行图像匹配, 以验证匹配算法的有效性, 因而诸如颗粒噪声、灰度变化和几何形变等对图像的影响可以通过相应的图像预处理来加以消除, 为此本文不再考虑这些因素的影响。

图 1(a) 为仿真实例 1 所采用的 Lena 参考图像; 图 1(b) 为 Lena 参考图像按上述变换方法进行变换后获得的变换图; 图 1(c) 为在变换图上任意截取的 Lena 实测图; 图 1(d) 为 Lena 参考图像的边缘



图 1 Lena 图像实测与参考图像匹配

特征图;图 1(e)为 Lena 实测图像的边缘特征图;图 1(f)为匹配后的结果图,该图是在获得匹配结果的基础上,将实测图的边缘特征图叠加到参考图的边缘特征图上的结果。从图上可以看出,匹配结果定位准确。通过测试,仿真实例 1 的匹配时间为 3.596 s。

在仿真实例 2 中选取的参考图像大小为 120×120 像素的城区遥感图像,实测图为 40×40 像素。同仿真实例 1 相似,首先将参考图像加上方差为 32

的高斯噪声,并旋转 3° ,再以此为基础,任意截取一个大小为 40×40 像素的区域作为实测图,然后采用本文匹配算法进行匹配仿真研究。

图 2(a)为仿真实例 2 所采用的城区遥感参考图像;图 2(b)为参考图像按上述变换后获得的变换图;图 2(c)为在变换图上任意截取的实测图;图 2(d)为城区遥感参考图像的边缘特征图;图 2(e)为城区遥感实测图像的边缘特征图;图 2(f)为匹配后



图 2 城区遥感图像实测与参考图像匹配

的结果图,该图是在获得匹配结果的基础上,将实测图的边缘特征图叠加到参考图的边缘特征图上的结果。从图上可以看出,匹配结果定位准确。通过测试,仿真实例2的匹配时间为2.873 s。

6 结 论

本文在满足景像匹配辅助导航系统对图像匹配要具有准确性和实时性性能的要求条件下,选用基于图像特征的图像匹配算法,同时,选用部分Hausdorff距离作为图像匹配时的相似性度量,并在此基础上,给出了一种快速有效的图像匹配算法。实际仿真结果表明,该图像匹配算法具有一定的容错和抗干扰能力,不仅可以有效克服图像噪声和几何畸变的影响,且图像匹配均能够在5 s以内完成,并与GPS输出周期(1 s)相当。对于具体的参考图像和实测图大小,由于可以依据景像匹配辅助导航系统对图像匹配时的具体导航误差范围和图像实际分辨率的要求来进行选择,因此,通过合理选择图像的大小和相应的分辨率完全可以保证景像匹配辅助导航系统对图像匹配的实时性和准确性的性能要求。

参 考 文 献

- 1 孙仲康,陈辉煌. 定位导航与制导[M]. 北京:国防工业出版社,1987.
- 2 柏菁,刘建业,熊智. 地形辅助/惯性/GPS组合导航系统的可视化仿真研究[J]. 中国惯性技术学报,2003,11(1):23~28.
- 3 Sim Dong gyu, Jeong Sang yong, Lee Doh hyeong. Hybrid estimation of navigation parameters from aerial image sequence [J]. IEEE Transactions on Image Processing,1999,8(3):429~435.
- 4 Sim Dong-gyu, Park Rae-hong, Kim Rin-chul, et al. Integrated position estimation using aerial image sequences [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002,24(1):1~18.

- 5 Huttenlocher Daniel P, Klanderman Gregory A, Rucklidge William J. Comparing images using the hausdorff distance[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1993,15(9):850~863.
- 6 Rucklidge W J. Efficient computation of the minimum hausdorff distance for visual recognition [R]. Technical Report 1454, Cornell University, Department of Computer Science, New York,1994.
- 7 John Canny. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1986,8(6):679~698.



熊智 1976年生,2001年获南京航空航天大学航空宇航推进理论工程与应用专业硕士学位,现为南京航空航天大学导航、制导与控制专业博士研究生。从事惯性导航与组合导航的研究工作。



刘建业 1957年生,1995年获南京航空航天大学航空制导与控制专业工学博士学位,现为南京航空航天大学自动化学院教授,博士生导师。主要从事惯性技术、GPS、组合导航和智能测控系统的研究。



曾庆化 1979年生,2000年获南京航空航天大学测试工程系学士学位,2002年获南京航空航天大学自动化学院硕士学位,现为南京航空航天大学导航、制导与控制专业博士研究生。从事惯性技术与组合导航系统的研究。



赖际舟 1977年生,2002年获南京航空航天大学自动控制系学士学位。2002年获南京航空航天大学自动化学院硕士学位,现为南京航空航天大学导航、制导与控制专业博士研究生。从事惯性技术与组合导航系统的研究。