

## 室内旋转相对定向算法\*

段世红, 刘燕忠, 何杰

(北京科技大学 计算机与通信工程学院, 北京 100083)

通讯作者: 何杰, E-mail: hejie@ustb.edu.cn



**摘要:** 为了在无基础设施部署的环境下,实现有效、准确的相对定位,提出了以超宽带信号传播时间(time of arrival,简称 TOA)测距为基础的旋转定向算法.围绕人体旋转无线接收设备,可模拟定向天线的灵敏度和功能.在旋转中,障碍物遮挡会在理论上造成最大的测距误差,从而可以确认目标发送设备相对接收设备的方向.但是,由于室内的复杂环境、多径效应、人体遮挡等因素,使得 TOA 测距产生较大的测距误差且误差分布是非高斯的.因此,相对于定向算法实际上是模板匹配的算法,在 3 种典型的模板匹配算法的基础上,实现了二次匹配算法,并对二次匹配中的关键参数进行了最优取值的分析,实现了高精度的水平方向检测,定向精度达到了正负 4 度,准确度相对于单匹配方法提高了 9%.

**关键词:** 相对定位;旋转定位;子模板匹配;超宽带;TOA 测距

中文引用格式: 段世红,刘燕忠,何杰.室内旋转相对定向算法.软件学报,2018,29(Suppl.(1)):10-20. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18002.htm>

英文引用格式: Duan SH, Liu YZ, He J. Indoor rotation relative orientation algorithm, 2018,29(Suppl.(1)):10-20 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18002.htm>

### Indoor Rotation Relative Orientation Algorithm

DUAN Shi-Hong, LIU Yan-Zhong, HE Jie

(School of Computer Science and Communication Engineering, Univerisyt of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** This paper proposes a rotational direction algorithm based on time of arrival (TOA) ranging with UWB transmission equipment. During rotating UWB receiver around the human body, the maximum and minimum ranging can confirm the relative direction of the transmitter and receiver. But in the indoor complex environment, multipath effect, human body will cause large TOA ranging errors and error distribution is non-Gaussian. So, the relative orientation is indeed a template matching problem. This paper implements the secondary matching scheme, and analyzes the key parameters in the secondary matching for optimal value analysis and realizes high-precision horizontal direction detection. 4 degrees deviation is achieved, and the accuracy is improved by 9% relative to the single match method.

**Key words:** relative positioning; rotation positioning; template matching; ultra wide band; TOA ranging

随着城市的现代化和推进,在灾难(如火灾)救援的同时,保障现场人员的人身安全的问题,受到了政府和相关研究机构的广泛关注.当在无法实现卫星定位的环境里出现紧急突发的情况时,救援人员如何及时并且准确地定位到目标人员的位置<sup>[1,2]</sup>,目前还没有比较经济、便捷且高效的定位技术解决方案<sup>[3]</sup>,国内外的室内定位技术仍处于发展阶段,且大多需要使用部署基础设施<sup>[4]</sup>.

图 1 所示为灾难环境下人员定位的场景.佩戴了超宽带(ultra-wide-band,简称 UWB)通信设备的受灾目标人

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61671056, 61302065, 61304257, 61402033); 北京市自然科学基金(4152036)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61671056, 61302065, 61304257, 61402033); Natural Science Foundation of Beijing, China (4152036)

收稿时间: 2018-05-01; 采用时间: 2018-08-30

员  $T$  躺在  $h$  高层的某个房间里,如图中水平状人形所示;搜救人员  $R$  手持 UWB 设备从建筑物的入口进入救援.此时, $T$  和  $R$  的相对位置可以用三元组表示  $\{h$ :相对高度; $\theta$ :水平相对角度; $d$ :水平相对距离 $\}$ .

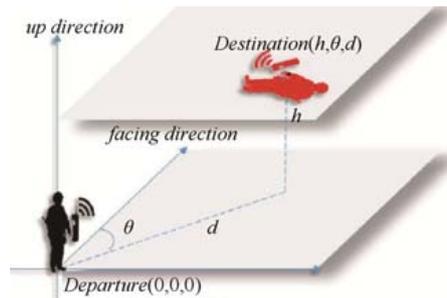


Fig.1 Rotational positioning scene

图 1 旋转定位的应用场景

目前,在紧急复杂的救援现场,救援者都会装配呼救器.然而,呼救器只能发出无线报警和声光报警信号来辅助搜救工作;在复杂的应急环境中,声光信号对搜救的帮助是极为有限的,并且通过这些信号找到求救消防员会需要大量的时间.在遇险消防员搜救技术研究方面,最常见的试验性方法是通过室内定位技术定位到报警人和搜救人在建筑内部的相对位置,然后根据定位结果规划报警人的搜救路径.在文献[7]中,无线定位系统通常用频率较高的传输信号,在室内环境中其穿透能力较弱,因此需要在室内部署大量的基站.但在突发的应急现场的室内区域部署大量定位基站是极其困难的,而且需要消耗掉大量时间,不利于在紧急突发状况实施救援.文献[8]利用手机的 WiFi 信号采用旋转定位的方法进行室内定位,该文对旋转定向方法的原理进行了分析和测量验证,并建立了旋转定向系统,实现了到目标点的路径规划.由于采用的是 WiFi 信号,通过信号强度值 RSS 的变化实现定向,精度不高,导航中需要多次旋转纠正才能找到目标.从上述分析可知,呼救器、无线基站定位、基于 RSS 的旋转定位等现有方法都无法满足遇险人员搜救的实战需求.因此,提出有效的搜索救援方案以提高搜救速度及精确度迫在眉睫.

本文设计了如后文图 8 所示的旋转接收节点作为搜救设备,利用气压计可以得到较为准确的  $h$ ;UWB 模块实现 TOA 测距具有较高的准确度.同时,在我们的前期工作中,针对非高斯噪声分布的测距误差,采用 Rlowess 平滑算法对测距误差的去噪声效果明显, $d$  值也能达到精度要求.因此,本文的工作重点就是要完成高精度的点到点相对定向,得到准确的  $\theta$ .

围绕阻碍信号的障碍物(如人体)旋转无线接收设备,可模拟定向天线的灵敏度和功能.在旋转中,障碍物遮挡会在理论上造成最大的测距误差,从而可以确认目标发送设备相对接收设备的方向,但是室内环境较为复杂,定位的面积较为狭小,遮挡物较多,定位的环境易发生变化,路径损失及多径传播较为严重等<sup>[5,6]</sup>,影响了信号在信道中的传输特征.总之,非视距(non line of sight,简称 NLOS)环境、多径效应、人体遮挡及其他外界因素会影响 TOA,使得 TOA 测距产生较大的测距误差且误差分布是非高斯的<sup>[9]</sup>.使用模板匹配的算法,将考虑旋转定向中的距离变化趋势,而不只是测距值,因此可提高相对定向的准确度.基于节点和人体构成的几何关系建立旋转距离模板,利用实际旋转测量值与模板的相关性,并在匹配数据中选择对应于模板预定的真实方向的测距值对应的角度作为搜索目标的相对方向.本文分析了 3 种匹配算法:欧氏距离、相关系数和匹配滤波器的定向效率,并提出了二次匹配的算法及算法参数的最佳选择,将其应用到上述 3 种匹配算法上,其结果都使得角度准确度提升了大约 9%左右.

基于以上分析,本文首先对室内旋转定位场景和人体遮挡造成的 TOA 测距误差进行了分析,建立了用于匹配的标准模板.然后在旋转定位测量数据上分析验证了 3 种单次模板匹配算法获得  $\theta$  的效率;并描述了二次匹配算法的实施过程.最后通过实验测试二次匹配算法的参数选择,结果表明,本文提出的二次匹配算法对上述 3 种单模板匹配算法都进行了优化,得到了更高的  $\theta$  精确度,为后续的路径规划提供了很好的数据基础.

### 1 旋转定向系统

UWB 信号包含了多个频段,传输稳定性高;基于 UWB 信号的 TOA(time-of-arrival)可以实现厘米级的测距<sup>[10]</sup>.本文设计的旋转定位系统就利用了 UWB 的 TOA 测距技术.搜救人员佩戴的 UWB 传输设备集成了电子罗盘称为旋转基站  $Rx$ ,被困人员携带的 UWB 传输设备称为目标点  $Tx$ .在搜救过程中, $Tx$  不断发送 UWB 信号,搜救人员平行伸直  $Rx$ ,以自己为圆心旋转 1 个周期,人体始终正对旋转基站.上述旋转定位场景如图 2 所示.每隔  $2^\circ$  记录数据二元组  $(\theta_i, l_i)$ .  $l_i$  是通过 TOA 测距得到的旋转基站和目标点之间的距离,  $\theta_i$  是电子罗盘测量得到的相应的角度,是旋转基站相对于磁北方向的夹角.旋转基站旋转 1 周,得到了一组角度和距离的信息序列  $\{(\theta_1, \hat{l}_1), (\theta_2, \hat{l}_2), \dots, (\theta_n, \hat{l}_n)\}$ ,其中,  $n$  是每次旋转测量的次数,在本文的测试中,  $n=180$ .

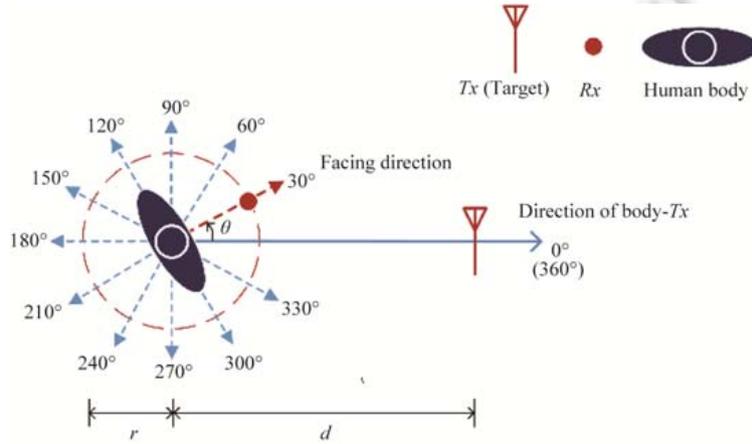


Fig.2 Rotary positioning

图 2 旋转定位示意图

然后将一个周期的测试数据与两个周期的模板数据进行匹配,与理论模板中最小距离值相对应的测试数据中的角度值即为匹配得到的方向,也就是搜救者面对求救者的方向.本节的内容就是建立模板.

#### 1.1 旋转定位几何模型

本文将上述旋转定位场景描述为如图 3 所示的几何关系.  $r$  为人体拿着  $Rx$  旋转的臂长即旋转半径,  $d$  为目标点  $Tx$  和旋转基站  $Rx$  之间的距离,  $\theta$  为人体所面对的方向与  $Tx$  之间的夹角,  $l$  为  $Rx$  和  $Tx$  之间的直接距离.

根据上述几何关系,基于  $r$ 、 $d$ ,可以得到  $l$  随  $\theta$  的变化公式,如下所示.

$$l(\theta) = \sqrt{(d - r \cos \theta)^2 + (r \sin \theta)^2} \tag{1}$$

$$l(\theta) = \sqrt{r^2 + d^2 - 2dr \cos \theta} \tag{2}$$

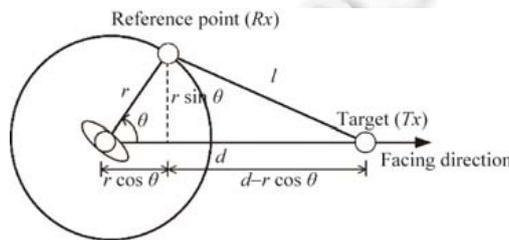


Fig.3 Rotation positioning geometry

图 3 旋转定位几何关系图

### 1.2 TOA 测距误差的特征模型

文献[9]中定义了 TOA 测距误差的组成公式,如下所示.其中, $l(\theta_i)$ 是在特定的方向角 $\theta_i$ 下旋转基站和目标点之间的真实距离,而 $\hat{l}(\theta_i)$ 是在 $\theta_i$ 时的 TOA 测距值, $e(\theta_i)$ 是测距误差值.

$$e(\theta_i) = \hat{l}(\theta_i) - l(\theta_i) = \varepsilon_d + \varepsilon_m + \varepsilon_{NHB} \times \delta_{NHB}(\theta_i) + \varepsilon_{HB} \times \delta_{HB}(\theta_i) \quad (3)$$

$\varepsilon_d$ 是物理器件造成的测量误差,与其他误差相比,其值可以忽略. $\varepsilon_m$ 是多径引起的测距误差,通常符合高斯分布. $\varepsilon_{NHB}$ 是在非视距环境下,建筑物中的墙等物体的遮挡造成的测距误差, $\varepsilon_{HB}$ 是人体遮挡造成的误差. $\delta(\theta)$ 是脉冲响应函数.当 $\theta_i$ 在信号被遮挡的角度范围内时, $\delta(\theta_i)=1$ ;否则, $\delta(\theta_i)=0$ .本文在多个视距(line-of-sight,简称 LOS)下和非视距(NLOS)环境下进行了大量测试,在每个场景下的旋转测量是 100 转.图 4 分析了两种场景下得到的典型测量值.

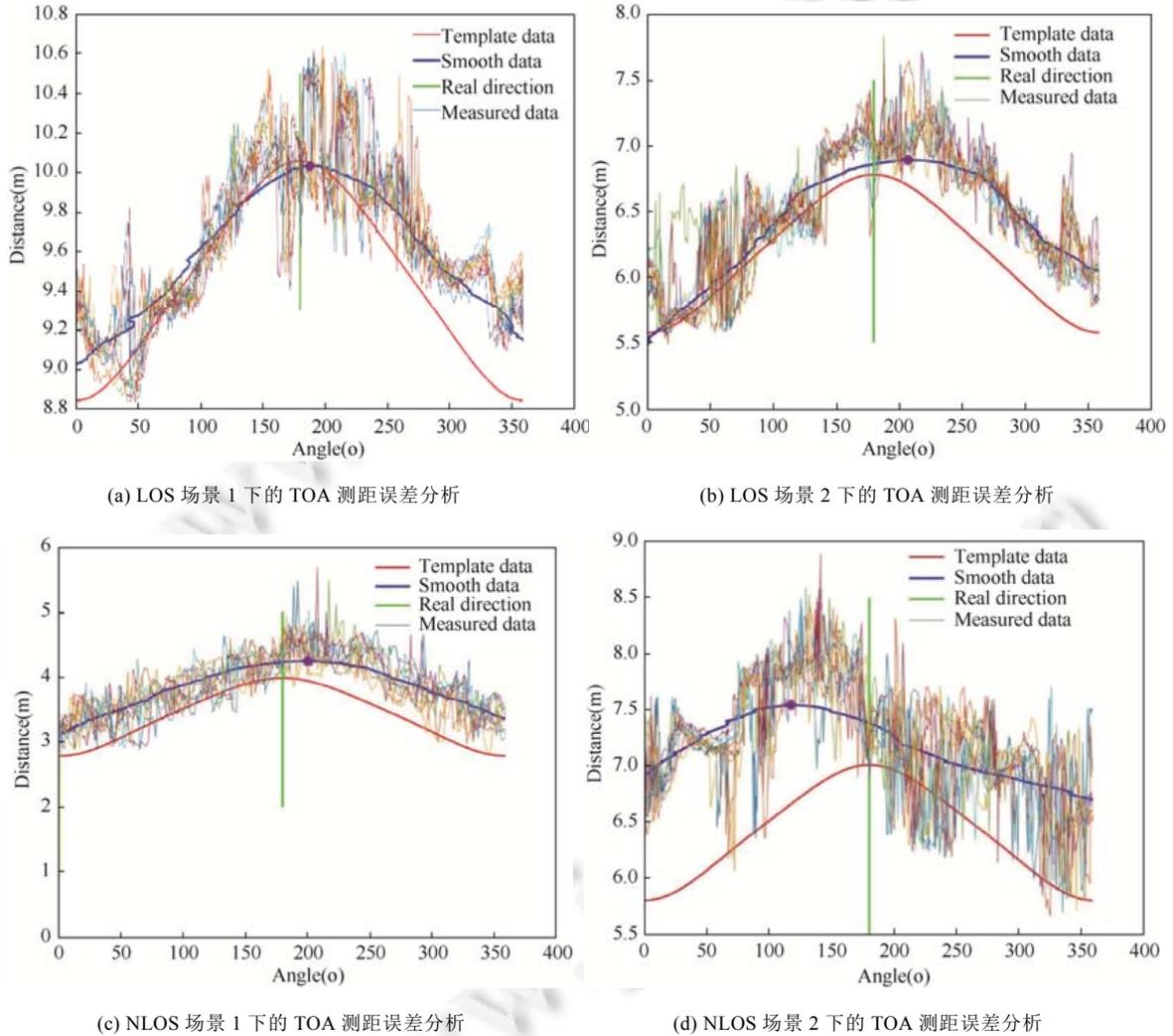


Fig.4 Analysis of rotation positioning TOA error in LOS and NLOS environment

图 4 不同场景下的旋转定位 TOA 测距误差分析

图 4 中,垂直线描述了实际的角度+180°,每个场景下旋转 100 转,测到的 500 组 $\{(\theta_i, l_i)\}$ 数据,对应的是图中的锯齿形曲线.可以看出,如文献[9]中所述的 TOA 测距误差特征:① 由于环境变化和影响因素的数量较多,旋转

过程中测距误差符合重尾分布,有明显的脉冲特征;② 在 NLOS 环境下测距误差的变化更大,相比而言,LOS 环境下的测距误差的变化更接近高斯分布.为了消除测量中的脉冲特征,本文首先采用了 Rlowess 算法<sup>[11]</sup>消除数据的异常点和噪声,得到了如图 4 所示的粗曲线(smooth data)表述的平滑后的测试数据,为之后的定向算法的准确性提供了基础.因为定向算法的准确度会受到测量中噪声的影响,提高信噪比就能很好地提高算法的定向精度,在本文的测试中,采用 Rlowess 算法平滑后的信噪比从原始数据的 11.76 提高到了 22.88.

每组 Rlowess 算法平滑后的数据都有一个最高点,对应于旋转后正背对目标点的方向,这个发现表明:通过旋转测距定向的算法是可行的,但只是靠确定最大距离值来定向,误差都比较大.而本文将定向问题转换为模板匹配问题,就是想通过范围匹配而不是点匹配来提高定向的精度.在第 1.1 节中,根据旋转基站、目标点和人体的几何关系已经推导出了实际距离随着旋转角度的变化规律,即标准模板,但实际上,旋转过程中人体的遮挡对 TOA 测距误差的变化起到了决定性的作用.

### 1.3 人体对 TOA 测距误差的影响模型

我们之前的工作<sup>[12]</sup>中定义了人体对 TOA 测距误差的分段影响模型,在人体遮挡了旋转基站和目标点之间测距用的 UWB 信号传输时,UWB 信号会在人体形成一个爬行波,造成多径效应;而在人体不遮挡 UWB 信号传输时,TOA 测距误差是由 UWB 信号在空气传播中的能量衰减引起的.文献[12]使用了一个经验值确认分段距离值,本文则是通过几何关系推导确认了分段依据.图 5 细致地定义了图 3 所示的几何关系中的遮挡扇区.人体的宽度为  $b$ ,手机与人体之间的距离为  $r$ .当人体和旋转基站的方向位于  $\vec{d}_1$  和  $\vec{d}_2$  之间的角度扇区内时,没有 LOS 路径会到达旋转基站,本文将这个角度扇区称为遮挡扇区.由于主路径被遮挡,在这个扇区观察到的信号强度将显著低于其他方向,信号爬行经过人体体表之后再到达旋转基站,因而会造成较大的测距值和测距误差变化.

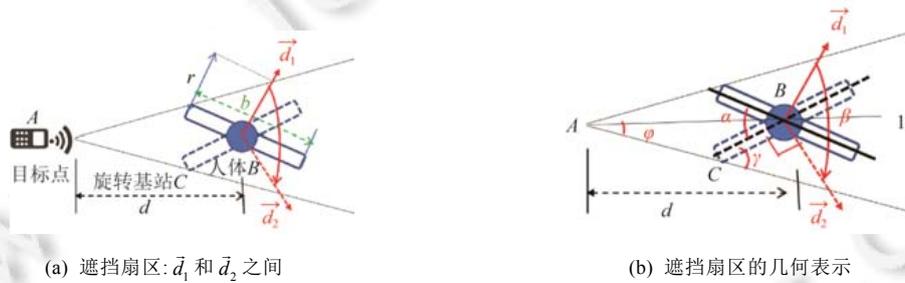


Fig.5 An abstract model of human shield effect

图 5 人体遮挡的抽象模型

从图 5(a)可以看出,旋转时,人体方向在  $\vec{d}_1$  和  $\vec{d}_2$  之间,人体将会遮挡旋转基站和目标点之间的 UWB 限号传输,因此  $\vec{d}_1$  和  $\vec{d}_2$  之间的角度定义了遮挡扇区,角度为  $\beta$ ,  $\beta$  值的定义如下式所示:

$$\beta = 180^\circ - 2 \left( \arctan \frac{2r}{b} - \arcsin \frac{br}{\sqrt{4r^2 + b^2}} \right) \quad (4)$$

通常,人体的宽度  $b \approx 0.4\text{m}$ ,因此,  $b \ll d, r \ll d$ ,

$$\beta \approx 180^\circ - 2 \arctan \frac{2r}{b} = 90^\circ \quad (5)$$

根据文献[10]中对人体遮挡建立的经验模型得到如式(6)所示的 TOA 测距误差:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{HB} &= G(\mu_{HB} + \sigma_{HB}) \\ \mu_{HB} &= -0.5371 \times d + 0.2241 \\ \sigma_{HB} &= -0.0471 \times d + 0.0537 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

在旋转过程中,公式(3)所示的 TOA 误差中只有人体遮挡造成的误差会是周期性发生变化的,其他误差在本文中没有修正,因此本文最终所用的模板是在标准模板的基础上增加了因人体遮挡造成的 TOA 测距误差之后

而得到的,具体如公式(7)所示.

$$l(\theta_i) = \begin{cases} \sqrt{d^2 + r^2 - 2 \times d \times r \times \cos \theta_i} + \varepsilon_{HB}, & \theta_i \in [135^\circ, 225^\circ] \\ \sqrt{d^2 + r^2 - 2 \times d \times r \times \cos \theta_i}, & \theta_i \in [0^\circ, 135^\circ) \cup (225^\circ, 360^\circ] \end{cases} \quad (7)$$

## 2 旋转定位算法

本文设计的旋转定位是二次子模板匹配的旋转定位算法.首先测试了 3 个大范围模板单次匹配策略,最终选择了加权欧氏匹配算法,将接收到的 TOA 测距值与公式(7)所建立的标准模板进行大范围匹配,匹配后的起点是预定位的方向  $\theta_{first}$ ;在  $\theta_{first}$  前后各取范围为  $span$  的数据建立新的待匹配数据集  $(\theta_{first-span}, \hat{I}_{first-span}), \dots, (\theta_{first+span}, \hat{I}_{first+span})$ ,记为  $\hat{S}_{quad}$ ,并建立范围为  $T$  的子模板,用子模板和取出的数据进行二次匹配,然后根据二次匹配得出定位的方向  $\theta_r$ .本文采用二次模板匹配算法的过程如图 6 所示.

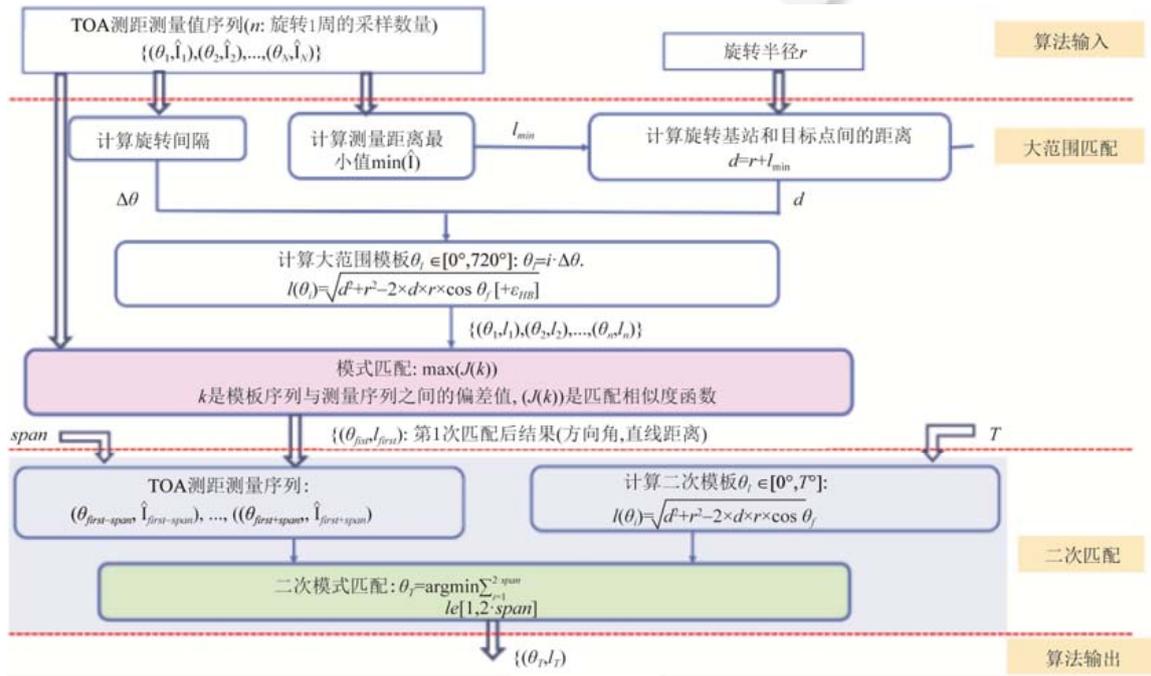


Fig.6 Quadratic pattern matching based rotation orientation algorithm

图 6 二次模式匹配旋转定向算法示意图

### 2.1 步骤 1:实现大范围匹配

将旋转 1 周得到的数据集  $S = \{(\theta_1, \hat{I}_1), (\theta_2, \hat{I}_2), \dots, (\theta_n, \hat{I}_n)\}$ ,与公式(7)中定义的标准模板数据进行匹配,找到与旋转测量数据匹配相似度函数最大的一段模板,偏移量记为  $k$ . $k$  对应的起点角度和距离就是大范围匹配得到的结果:  $\{\theta_{first}, l_{first}\}$ ,从而完成了初定向.

#### 2.1.1 $[0^\circ, 720^\circ]$ 大范围理论模板的建立

在计算模板数据时,需要已知目标点与手持旋转基站的搜救者之间的直线距离  $d$ ,在实际的相对定位系统中, $d$ 是无法事先知道的.所以在算法中,用旋转 1 周采集到的最短距离  $l_{min}$  表示目标点与旋转节点之间正对时的直线距离.虽然存在测距误差,但最终造成的偏差不大,是实用效率最高的选择.但是,如图 4 所示, $l_{min}$  不能直接用于相对方向,误差会达到  $\approx 50^\circ$ .旋转半径的变化会影响定向中的几何关系以及 TOA 测距误差,本文针对实用场景,将  $r$  定义为手臂的长度.因此  $d = l_{min} + r$ .

为了实现旋转1周的数据匹配,标准模板描述了 $[0^\circ, 720^\circ]$ 的角度变化下的距离变化 $l(\theta)$ ,如图7中的虚线所示.在匹配中,我们需要建立对应于测量数据序列的模板序列,即确认 $\{(\theta_1, l_1), (\theta_2, l_2), \dots, (\theta_{2 \times n}, l_{2 \times n})\}$ 的取值, $\Delta\theta$ 是旋转中的角度变化,则 $\theta_i = 0^\circ, \theta_{i+1} = \theta_i + \Delta\theta$ 当 $\theta_i \in [0^\circ, 360^\circ]$ 时,利用公式(7)计算对应的 $l_i$ ,当 $\theta_i \in [360^\circ, 720^\circ]$ 时,计算 $l_i$ 时用的角度是 $\theta_i - 360^\circ$ . $\theta_i = 0^\circ, 360^\circ, 720^\circ$ 时,表示旋转基站正对目标点,被标记为 $\theta_{true}$ . $\theta_i = 180^\circ, 540^\circ$ 时,表示旋转基站背对目标点,被标记为 $\theta_{opposite}$ .

### 2.1.2 大范围粗匹配的基本原理

测量数据序列 $S = \{(\hat{\theta}_1, \hat{l}_1), (\hat{\theta}_2, \hat{l}_2), \dots, (\hat{\theta}_n, \hat{l}_n)\}$ 中的元素个数是 $n$ ,定义 $k$ 是模板序列的偏移量 $0 \leq k \leq 360/\Delta\theta$ ,模板数据序列依次为 $T_k = \{(\theta_{1+k}, l_{1+k}), \dots, (\theta_{1+k+n}, l_{1+k+n})\}$ ,匹配时选择合适匹配度函数 $J(k)$ , $J(k)$ 最大时,模板数据序列中对应 $\theta_{true}$ 的测量数据的 $\hat{\theta}_i$ 表示旋转基站和目标点之间的方向夹角.即与 $\theta_{true}$ 对应的位置 $i = 360/\Delta\theta - k$ , $S$ 中 $(\hat{\theta}_i, \hat{l}_i)$ 就是初匹配后找到的方向角和距离( $\theta_{first}, l_{first}$ ).

本文分析了3种匹配算法:加权欧式距离、相关系数匹配和匹配滤波器,并定义了匹配算法的匹配度函数 $J(k)$ 的计算公式.

#### 2.1.2.1 加权欧氏距离匹配算法

欧氏距离匹配算法依次定义 $S$ 和 $S_k$ 中的距离参量的欧氏距离之和 $E_k$ ,并找到 $E_k$ 最小的数据序列作为匹配度最高的子模板.本文实现的是加权欧氏距离匹配算法,因此,

$$E_k = \sum_{i=1}^n w_i (\hat{l}_i - l_i)^2, \quad 0 \leq k \leq 360/\Delta\theta \quad (8)$$

其中, $w_i$ 的设定采用小波变换来进行权值.匹配度函数定义为 $J(k) = 1/E_k$ .

#### 2.1.2.2 相关系数(标准化的协方差)

在信号处理中,为了达到信号检测、识别和提取的目的,经常会研究两个信号某种程度的相似性.相关系数可以用来规范两个信号的标准差,表明两个信号的相关程度.相关系数是描述信号相似性的常用方法.对于数据序列 $S, T_k$ ,相关系数的定义为

$$R(S, T_k) = \frac{\sum_{j=1}^n (S_j - \bar{S})(T_{kj} - \bar{T}_k)}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (S_j - \bar{S})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^n (T_{kj} - \bar{T}_k)^2}} \quad (9)$$

$$\bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (S_j), \quad \bar{T}_k = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (T_{kj})$$

相关系数 $R$ 的取值在 $-1$ 到 $1$ 之间,刻画了两者之间的近似程度的线性描述.一般来说, $R$ 越接近 $1$ ,两者越近似.所以匹配度函数定义为 $J(k) = R(S, T_k)$ .

#### 2.1.2.3 匹配滤波器

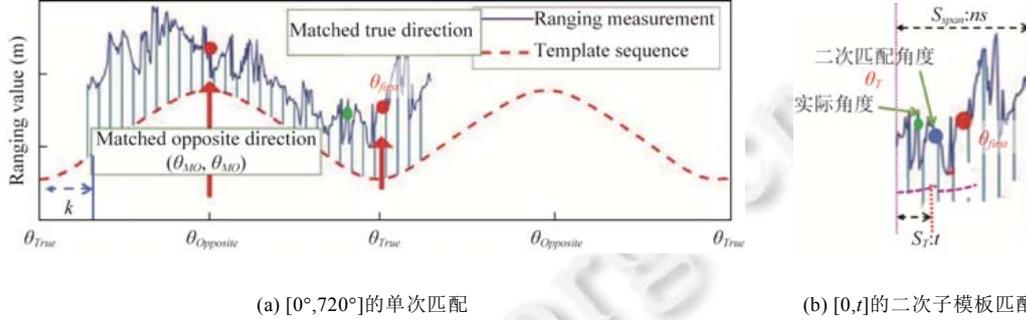
匹配滤波器是用测量数据序列 $S$ 设计匹配滤波器,而将模板数据 $T$ 依次送入匹配滤波器作为输入,以确认 $T$ 与 $S$ 的匹配程度,匹配程度是用信噪比来衡量的.假设 $v$ 是白噪声,则定义匹配滤波器的输入是 $x = T + v$ . $h$ 是滤波器的传输函数,是用 $S$ 序列定义的,即有 $h[n] = S^*[N-1-n], n=0, \dots, N-1$ . $S^*$ 表示 $S$ 的转置,则有 $x$ 经过滤波后得到的信噪比: $SNR(k) = \frac{|h^H T(k)|^2}{h^H R_v h}$ ,其中, $h^H$ 表示 $h$ 的共轭转置后的向量, $R_v$ 是噪声 $v$ 的协方差矩阵: $R_v = E\{vv^H\}$ , $E$ 是期望.根据匹配滤波器的物理含义, $SNR$ 越大,说明测试的 $T_k$ 与 $S$ 的匹配度越高.因此,匹配度函数的定义为 $J(k) = SNR(k)$ .

## 2.2 步骤2:二次子模板匹配

通过大范围粗匹配后,已经可以将测试数据和标准模板建立起对应关系,但是由于在旋转1周的过程中,人体遮挡会带来更大的测距误差,使得在大范围匹配下得到的初步结果精度不够高,为了进一步提升定向精度,本文提出了利用子模板实现二次匹配的方法,如图7(a)所示.标准模板中 $0^\circ$ 为正对求救者方向,所以子模板是从 $0^\circ$ 开始,间隔 $\Delta\theta$ 取 $t$ 个模板数据,因此子模板 $S_T = \{(\theta_1, l_1), \dots, (\theta_t, l_t)\}$ ,用于匹配的测量数据是 $S$ 的子集,以初匹配中得到 $\theta_{first}$ 为中心,取 $ns$ 个数据,得到测量子集 $S_{span}$ .

$$S_{span} = \{(\varphi_1, \hat{I}_1), (\varphi_2, \hat{I}_2), \dots, (\varphi_{ns}, \hat{I}_{ns})\} = \{(\hat{\theta}_{first-ns/2}, \hat{I}_{first-ns/2}), \dots, (\hat{\theta}_{first+ns/2}, \hat{I}_{first+ns/2})\} \quad (10)$$

二次匹配采用的匹配算法是欧氏距离匹配法,如图 7(b)所示,用  $S_T$  分别依次与  $S_{span}$  中的  $t$  个数据进行匹配,  $S_{span}$  中的数据起始偏移量为  $k(0 \leq k \leq (ns-r))$ ,  $E_k = \sum_{i=1}^n (\hat{I}_{i+k} - I_i)^2$ , 欧氏距离之和最小的就是匹配度最高的,匹配度函数定义为  $J(k) = 1/E_k$ , 选择  $J(k)$  最大的一段测量数据,选择此时  $\theta_1$  对应的  $S_{span}$  中的元素  $(\varphi_k, \hat{I}_k)$ , 就是二次匹配后得到的旋转基站和目标点之间的方向角与直线距离,记为  $(\theta_T, I_T)$ .



(a)  $[0^\circ, 720^\circ]$  的单次匹配

(b)  $[0, t]$  的二次子模板匹配

Fig.7 Secondary sub-template matching algorithm

图 7 二次子模板匹配算法

子模板匹配算法中,我们选择了初匹配时得到的方向角  $\theta_{first}$ , 并以  $\theta_{first}$  为中心取测量数据的子集进行匹配. 子集中表示的方向已经接近正对方向, TOA 测距不再受人体遮挡因素的影响, 误差和误差的变化相对较小, 匹配准确度会有所提高.

### 3 实验验证

为了验证旋转定向算法的性能,我们在北京科技大学的机电信息楼进行了现场测试.所使用的测量系统如图 8 所示,包括旋转基站和目标前标签.旋转基站主要由无线射频模块、微控制器(MCU)、电子罗盘、气压传感器、显示屏等器件组成.

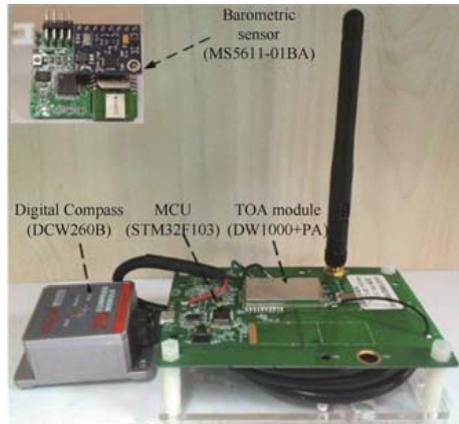


Fig.8 Device photo

图 8 实物图

目标则主要由无线射频模块、MCU、气压传感器等组成.具体的测试场景分为非视距环境和视距环境,分别如图 9 和图 10 所示.在图 9 所示的教室中,有墙的阻隔,还有各种桌椅,是一个比较复杂的非视距环境,图 10 所示的测试场景下没有墙,相对空旷,旋转基站和目标点之间存在直视路径.在每个场景下本文做了 500 组的旋转

测试.

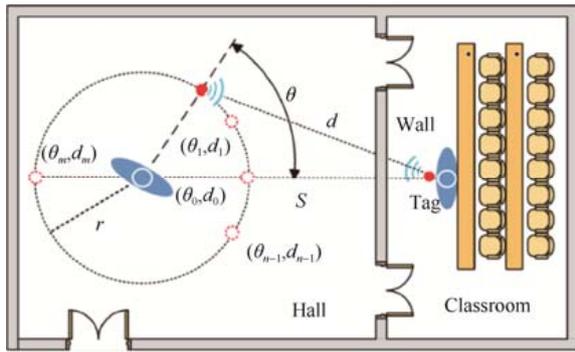


Fig.9 Non-Line-of-Sight test scenario

图 9 非视距环境测试场景示意图

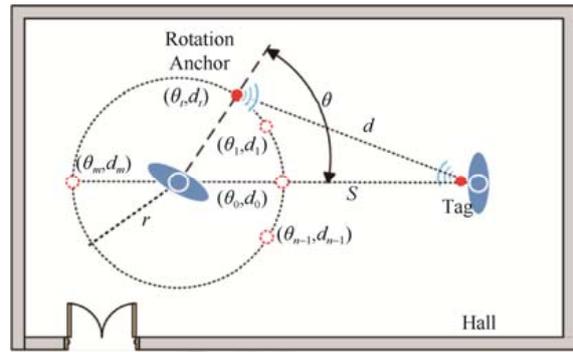


Fig.10 Line-of-Sight test scenario

图 10 视距环境测试场景示意图

### 3.1 子模板二次匹配算法中参数的选择

二次匹配算法中有两个关键参数,测量数据的截取范围  $span$  和子模板的范围  $T$ .本文选择了不同的参数取值,并比较了不同参数取值对基于加权欧氏距离匹配算法的二次子模板匹配精度的影响.首先我们定义  $span = ns \times \Delta\theta$ ,  $ns$  是之前已经定义了的二次匹配时测试数据集的长度,  $span$  是对应的角度范围.本文分别选择  $span=20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, T=4$ ,并统计了二次匹配后的角度误差,结果如图 11 所示.  $span$  选择  $40^\circ$  时的效果最好;  $span$  越小,用于匹配的数据量越小,而且在测试场景比较复杂的情况下,初匹配的误差比较大,  $span$  对应的数据集可能没有包含真实的方向角度;  $span$  再大会引入更多的测量误差,使得匹配精度降低.

本文选择  $span=40^\circ, T=3, 4, 6, 9$ ,分别统计二次匹配后的角度误差,结果如图 12 所示.随着  $T$  值的增大,计算复杂度会有所降低,但是定向误差也会增大;  $T$  值变小,复杂度会增大,而且在验证中发现,会存在不稳定因素,因此本文选择  $T=4$ .

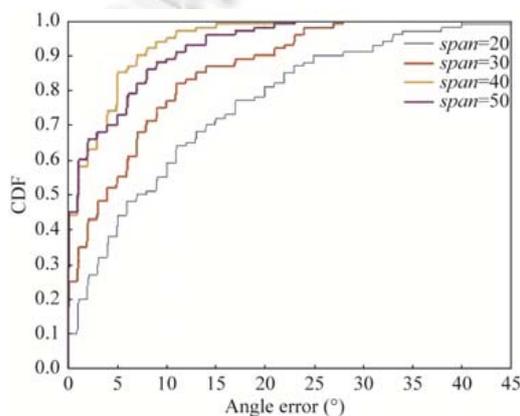


Fig.11 CDF plot of angular error with different  $span$

图 11 不同  $span$  下角度误差的 CDF 图

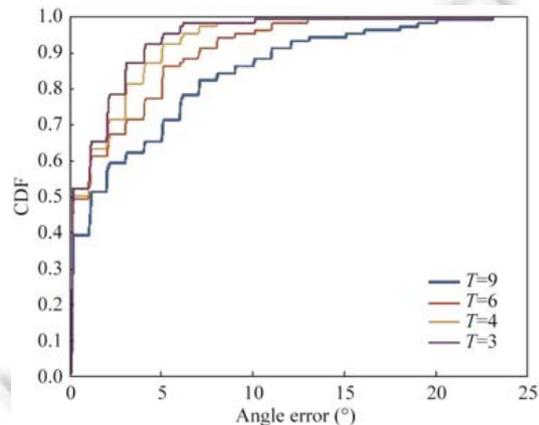


Fig.12 CDF plot of angular error with different  $T$

图 12 不同  $T$  下角度误差的 CDF 图

### 3.2 子模板二次匹配对旋转定向精度的影响

本文选择  $span=40^\circ, T=4$ ,初匹配方式分别选择了加权欧氏距离、相关系数匹配、匹配滤波器算法,利用第 2.2 节所述的子模板二次匹配算法,分别统计二次匹配后的角度误差,结果见表 1.在初匹配中采用加权欧氏距离定向的效果最佳,但是二次匹配后对每种算法精度的提高,效果非常明显.不同初匹配算法和二次子模板匹配算法的定向误差的比较分别如图 13(a)~图 13(c)所示.可以看出,二次匹配后的角度误差仍会出现较大的误差,但是

整体上,定向角度的准确性还是明显有所提高.

表 1 不同算法下定向角度误差

算法	误差
相关性	15.702 4
二次相关性匹配	3.420 4
匹配滤波器	18.614 0
二次匹配滤波器	3.556 5
加权欧式匹配	14.965 1
二次加权欧式匹配	3.391 0

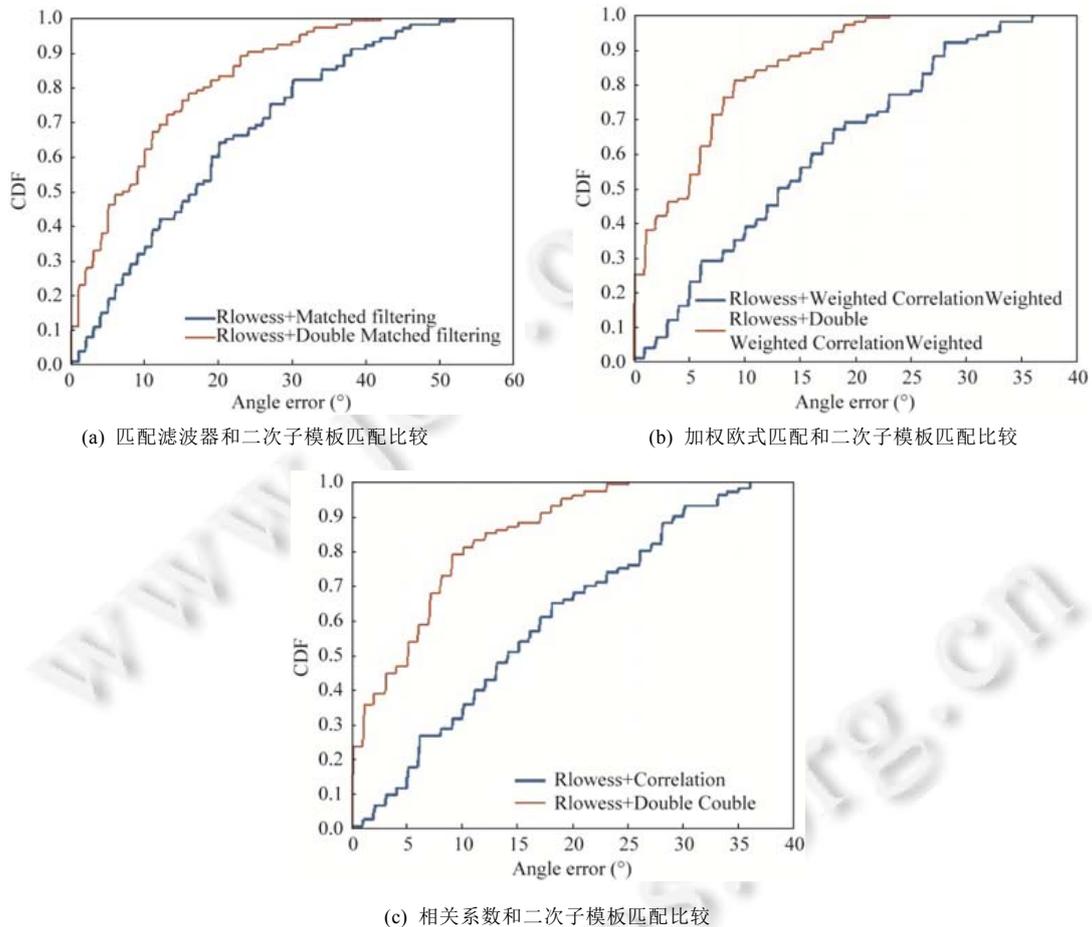


Fig.13 Improvement of quadratic subtemplate matching algorithm

图 13 二次子模板匹配算法对不同初匹配的影响

#### 4 总结与展望

本文提出了一种在室内环境中基于旋转基站的点对点人员相对定向算法,解决了例如搜索被困的消防员或引导迷路的消防员到出口等非卫星环境中的相对定位中的关键问题.本文分析了 TOA 测距误差在视距和非视距下的变化规律,以及人体遮挡对 TOA 测距误差的影响,并用上述模型修正了基于几何关系建立的旋转距离模板.另外,分析了 3 种匹配算法,完成了初匹配,提出了二次子模板匹配的算法,明显提高了上述 3 种初匹配算法的定向精度.最后,通过实际实验测试验证了所提算法的实用性和有效性.

由于室内环境复杂多变以及救援时间紧迫,进一步优化在不同环境下方向识别精度以及提高算法的实时性将成为研究的重点.本文之后的工作将集中研究复杂环境下的模板建立以及降低算法的时间复杂度等,进而提高搜救的效率.

#### References:

- [1] Lin XY, Ho TW, Fang CC, *et al.* A mobile indoor positioning system based on iBeacon technology. In: Proc. of the 37th Annual Int'l Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). IEEE, 2015. 4970–4973.
- [2] Zhang W, Chowdhury MIS, Kavehrad M. Asynchronous indoor positioning system based on visible light communications. *Optical Engineering*, 2014,53(4):045105.
- [3] Moayeri N, Mapar J, Tompkins S, Pahlavan K. Emerging opportunities for localization and tracking. *IEEE Wireless Communication*, 2011,18(2):8–9.
- [4] Xia Y, Wan JB, Liu ST, Liu ZH. Design and implementation of indoor positioning system based on the signal strength of Wi-Fi and base station. *Digital Communication*, 2012,39(6):21–25 (in Chinese with English abstract).
- [5] Wu ZH, Han Y, Chen Y, *et al.* A time-reversal paradigm for indoor positioning system. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2015,64(4):1331–1339.
- [6] He J, Geng Y, Liu F, *et al.* CC-KF: Enhanced TOA performance in multipath and NLOS indoor extreme environment. *IEEE Sensors Journal*, 2014,14(11):3766–3774.
- [7] Moeglein M, Riley W. Method and apparatus for creating and using a base station almanac for position determination. U.S. Patent 8,532,567[P], 2013-9-10.
- [8] Zhang Z, Zhou X, Zhang W, *et al.* I am the antenna: accurate outdoor AP location using smartphones. In: Proc. of the Int'l Conf. on Mobile Computing and NETWORKING. ACM, 2011. 109–120.
- [9] Wang P, He J, Xu L, *et al.* Characteristic modeling of TOA ranging error in rotating anchor-based relative positioning. *IEEE Sensors Journal*, 2017,17(23):7945–7953.
- [10] Gezici S, Tian Z, Giannakis GB, *et al.* Localization via ultra-wideband radios: A look at positioning aspects for future sensor networks. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2005,22(4):70–84.
- [11] Feng Y, Xue Y, Song J. An iterative-weighted-average algorithm for background modeling in surveillance video scenarios. In: Proc. of the IEEE Int'l Symp. on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting. IEEE, 2017. 1–4.
- [12] He J, Wu YN, Duan SH, Xu LY, Lü JH, Xu C, Qi Y. Model of human body influence on UWB ranging error. *Journal on Communications*, 2017,38(a01):58–66 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献:

- [4] 夏英,万建斌,刘素彤,刘兆宏.基于 Wi-Fi 和基站信号强度的室内定位系统设计与实现. *数字通信*,2012,39(6):21–25.
- [12] 何杰,吴雅南,段世红,徐丽媛,吕家慧,徐诚,齐悦.人体对 UWB 测距误差影响模型. *通信学报*,2017,38(a01):58–66.



段世红(1973—),女,博士,副教授,CCF 专业会员,主要研究领域为群智协同计算,无线信道模型,姿态识别,相对定位.



何杰(1983—),男,博士,副教授,CCF 专业会员,主要研究领域为无线定位,物联网技术研究.



刘燕忠(1992—),男,硕士生,主要研究领域为无线通信,室内定位.