基于声音的分布式多机器人相对定位

吴玉秀 [1] 孟庆浩 [1] 曾 明 [1]

摘 要 提出了一种基于声音的分布式多机器人相对定位方法. 首先, 每个机器人通过声源定位算法估计发声机器人在其局部坐标系下的坐标; 然后, 每个机器人 (不含发声机器人) 通过无线通信方式将发声机器人在其坐标系下的坐标广播给所有其他机器人, 通过坐标变换每个机器人可计算出所有其他机器人在其坐标系下的坐标, 从而实现分布式相对定位. 理论推导及实验证明只要两个机器人先后发声, 通过本文所提方法即可实现多机器人相对定位. 室内外环境中采用 6 个自制小型移动机器人实验表明, 所提方法在 3 米的范围内可实现 16 厘米的相对定位精度.

关键词 多机器人系统, 分布式系统, 相对定位, 声源定位

引用格式 吴玉秀, 孟庆浩, 曾明. 基于声音的分布式多机器人相对定位. 自动化学报, 2014, **40**(5): 798−809

DOI 10.3724/SP.J.1004.2014.00798

Sound Based Relative Localization for Distributed Multi-robot Systems

WU Yu-Xiu[1] MENG Qing-Hao[1] ZENG Ming[1]

Abstract A sound-based relative localization method for distributed multi-robot systems is proposed. Firstly, each robot estimates the location of the sounding robot in its local coordinate system via a sound-source localization algorithm. Secondly, each robot (except the sounding robot) sends the local coordinate to all the other robots via wireless communication, and then each robot calculates the locations of all the other robots in its local coordinate system using coordinate transformation, thus the distributed relative localization is realized. Theoretical derivation and experiments prove that as long as any two robots send sounds successively, the relative localization of multi-robot systems can be realized using the proposed method. Experiments in indoor and outdoor environments using six self-made small mobile robots show that a relative localization accuracy of sixteen centimeters within a range of three meters could be achieved based on the proposed method.

Key words Multi-robot system, distributed system, relative localization, sound source localization

Citation Wu Yu-Xiu, Meng Qing-Hao, Zeng Ming. Sound based relative localization for distributed multi-robot systems. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(5): 798−809

近年来, 分布式的多智能体/机器人系统得到了很多学者的关注, 其中蜂拥 (Flocking)[1]、分布式编队[2]、分布式标量场建图[3] 以及移动传感器网络的目标跟踪与监测[4] 等问题都是研究的热点. 在上述问题中, 智能体/机器人不需得到大范围内所有其他智能体/机器人的位置信息, 但每个智能体/机器人与其可探测范围内其他智能体/机器人的位置信息是必不可少的; 另外, 受测量对象 (如气味、温度和浓度等) 在随机环境中不均匀的传播特性等的限制, 为了使各机器人测得的信息相关, 以便进行融合和估计, 机器人之间的距离不宜太大, 所以多机器人小范围内的定位技术有一定的应用前景.

无论是室内还是室外环境的多机器人定位问题, 目前都已有一些学者利用现有传感技术对其进行了研究[5−7]. 在实际应用中, 整个系统的机器人数量大、体积一般较小, 故要求实现定位的装置具有体积小、重量轻、实时性好的特点[1, 5, 8].

多机器人的定位方法主要可以分为全局定位和相对定位两种, 全局定位是指所有的机器人可以直接得到在全局坐标系中的坐标[5], 而相对定位是指每个机器人均可以得到其周围所有机器人在其坐标系下的坐标. 全球定位系统 (Global positioning system, GPS) 是最常用的室外全局定位方法[9−10], 但通常价格便宜的民用 GPS 精度不高, 而高精度的 DGPS (Differential GPS) 价格贵且体积大, 不适合安装在体积较小且廉价的机器人上. 全局视觉是室内

收稿日期 2013-03-19 录用日期 2013-09-18
Manuscript received March 19, 2013; accepted September 18, 2013
国家自然科学基金 (61271321, 60875053), 教育部博士点基金 (20120032110068), 天津市科技支撑计划项目 (14ZCZDSF00025) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61271321, 60875053), Doctoral Programs Foundation of the Ministry of Education of China (20120032110068), and Tianjin Key Technology Research and Development Program (14ZCZDSF00025)
本文责任编委 于海斌
Recommended by Associate Editor YU Hai-Bin
1. 天津大学电气与自动化工程学院机器人与自主系统研究所 天津 300072
1. Institute of Robotics and Autonomous Systems, School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072

通常使用的全局定位方式[11], 即在机器人的外部架设全局摄像头辅助移动传感器节点进行定位, 但这种方式不利于节点组成完全分布式的系统. 另外, 机器人利用全向/非全向视觉探测全局路标, 根据已知的全局地图进行匹配和计算也可实现全局定位 (该方法也称为机器人自定位)[12−14], 该定位方法需要先验得知路标的全局位置和地图构成, 在未知环境中不易实施.

应用全向视觉传感器并配以相应的识别和标定算法进行相对定位的技术已比较成熟[15−17]. 但图像处理对硬件的处理速度要求较高, 在硬件简单、数量较多且廉价的机器人上实现比较困难.

基于超声信号的相对定位主要分两类, 一类是使用少量的超声传感器加上相应的机械结构, 把方向性很强的超声信号转化到 360° 全向传播, 然后用固定位置的超声换能器接收超声信号, 根据接收到数据的不同, 得出被测点的位置. 使用这类方法的装置体积一般都比较大, 无法安装在较小的移动机器人上[7]. 另一类是在 360° 的范围能等间距地放置相同数量的超声发送和接收换能器, 根据接收到的带编码的数据判断发声节点的位置[18]. 第二类方法中超声信号易被遮挡, 产生很大误差.

文献 [5] 使用高频调制的红外传感器实现多个小型机器人的相对定位, 不但提高了定位的精度, 而且加快了定位的频率. 但此法的精度受到地面状况影响较大, 另外其仅限于室内环境应用.

文献 [19] 给出了一种基于单频信号的声音协作定向的方法, 该方法使用 8 个均匀分布在一个圆上的麦克风接收声强的不同, 通过模糊推理估计声源的方向, 这种方法的精度随麦克风数量增加而减小, 且在估计声源方向的同时, 没有得到声源的距离, 因此不能直接用于多机器人之间的相对定位.

本文提出了一种新的基于声音收发的二维空间内的多机器人主动协作相对定位方法. 所提方法为完全分布式, 在传感器探测范围内, 每个机器人都可自主地确定环境中其他机器人在其坐标系下的坐标. 为保证多机器人系统的实时性, 希望使用的发声机器人的数量越少越好. 故文中给出了多机器人实现相对定位所需最少发声机器人数量的理论证明. 结果表明: 在一个定位周期内, 两个机器人先后作为声源存在, 即可完成声音传感器感知范围内所有机器人之间的相互定位. 在实际定位过程中, 多机器人系统可根据测量值动态确定哪个机器人需要作为声源状态存在, 以实现分布式相对定位, 使得定位算法在机器人数量动态变化的情况下仍然有效.

在装置实现方面, 鉴于目前应用在机器人声源定位模块中的麦克风阵列拓扑直径较大[8, 20] 的情况, 此处使用蜂鸣器发出的频率相对较高的单频声音作为目标信号, 采用相对距离小于或等于声源信号波长 1/2 的两对麦克风垂直组成的 “十” 字形阵列. 这样不但可以减小计算量, 还可有效控制定位装置的尺寸, 以满足小型机器人体积的需要. 同时, 上述麦克风之间距离的选择还可以为计算声音到达时间差的互相关运算加窗, 进一步提高了实时性. 此外, 每个机器人配置两个无线通信模块, 一个用于同步声音的发送与接收, 另一个用于组网以向环境中其他机器人广播定位结果.

1 基于声音的相对定位

所提相对定位算法包括声源定位及协作定位两部分. 声源定位是指系统中的所有机器人对发声机器人的距离和方位进行估计, 从而每个机器人都可以计算出发声机器人在其坐标系下的坐标; 协作定位是在声源定位的基础上完成的, 每个机器人通过无线广播将发声机器人在其坐标系下的坐标传达给其他机器人, 继而根据接收到的其他机器人广播的声源坐标信息, 在其坐标系下, 通过坐标变换计算出其他机器人的坐标. 为了提高系统的实时性, 发声机器人的数量越少越好. 通过证明 (详见第 1.2 节的定理 1 及引理 1), 只要两个机器人先后作为声源发声, 即可实现整个系统的相对定位.

1.1 声源定位

声源定位是确定发声机器人在其周围其他机器人局部坐标系下的坐标. 此处采用麦克风阵列实现, 相应的定位装置见第 2.1 节.

常用的基于麦克风阵列的声源定位技术包括: 到达时间差 (Time differences of arrival, TDOA) 技术[19, 21−23]、基于最大输出功率的可控波束形成技术[24−25] 和以多重信号分类 (Multiple signal classification, MUSIC) 法为代表的高分辨率谱估计技术[26−27]. 文献 [8] 指出, TDOA 方法在三种方法中所需的麦克风数量最少, 并且计算量较小, 可以实时实现. TDOA 法需先估计出声源信号与麦克风阵列中的麦克风之间的时间延迟, 然后利用几何关系计算出声源的位置. 本文中, 由于发声机器人和进行定位的机器人可以通过无线通信使声音信号同步, 因此可以把到声源的距离估计和声源所在角度的估计分步进行. 我们采用基于远场模型的 TDOA 法估计声源方向, 采用声音到达时间 (Time of arrival, TOA)[23] 的方法估计声源到麦克风阵列的距离, 这样使得计算更加简便.

1) 声源方位估计

本文采用 4 个麦克风组成的传感器阵列对声源进行定位, 如图 1 所示. 4 个麦克风 $M1$、$M2$、$M3$ 和 $M4$ 成 “十” 字形结构, 表示两个相对麦克风之间

的距离, α、β 分别是坐标原点到声源之间的连线与 X 轴正向、Y 轴正向之间的夹角, θ 与 s 为声源方向与距离估计的结果.

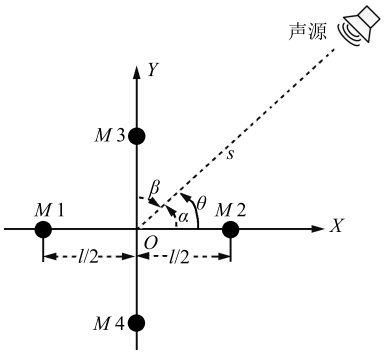


图 1 麦克风阵列构型[28]

Fig. 1 Microphone array configuration[28]

如图 1 所示, 麦克风 $M1$ 和 $M2$ 接收到的经过硬件滤波的含有噪声的单频信号 $x_1(n)$ 和 $x_2(n)$ 可以描述如下:

$$x_1(n) = \alpha_1 s(n-\tau_1) + v_1(n) \tag{1}$$

$$x_2(n) = \alpha_2 s(n-\tau_2) + v_2(n) \tag{2}$$

其中, $s(n)$ 是声源信号, τ_1 和 τ_2 是声音从声源传播到两个麦克风的时间, α_1 和 α_2 是声音衰减系数, v_1 和 v_2 是互不相关的均值为零的高斯白噪声. $x_1(n)$ 和 $x_2(n)$ 的互相关函数可以表示为

$$R_{12}^{cc}(\tau) = \mathrm{E}(x_1(n)x_2(n-\tau)) \tag{3}$$

式 (3) 中, E 表示数学期望. 设声音到达麦克风 $M1$ 和 $M2$ 的时间差为 τ_{12}. 由于 v_1 和 v_2 是不相关的高斯白噪声, 将式 (1) 和式 (2) 代入式 (3) 可以得出:

$$R_{12}^{cc}(\tau) = \mathrm{E}(\alpha_1\alpha_2 s(n-\tau_1)s(n-\tau_2-\tau)) = \alpha_1\alpha_2 R_S(\tau-\tau_{12}) \tag{4}$$

其中, $R_S(\tau-\tau_{12})$ 是 $s(n)$ 的自相关函数. 根据相关函数的性质, $R_{12}^{cc}(\tau)$ 在 $\tau=\tau_{12}$ 时有最大值, 因此 τ_{12} 为 $R_{12}^{cc}(\tau)$ 取峰值时对应的 τ 值, 且[21]:

$$\tau \in \left(-\frac{l}{c}, \frac{l}{c}\right) \tag{5}$$

其中, c 表示声音传播的速度.

在本文所述的相对定位模块中, 蜂鸣器发出的声音信号为单频信号, 我们选择 $l \le \lambda/2$ (λ 为声音的波长), 则有 $\tau \in (-T/2, T/2)$, 则可知估计的时间差误差不可能大于一个声音周期, 且可以用 $(-T/2, T/2)$ 为相关运算加窗, 从而可减少计算量, 提高定位系统的实时性.

综上所述, 可得 $M1$、$M2$ 到声源距离的差 d_1 为

$$d_1 = c\tau_{12} \tag{6}$$

基于声音传播的远场模型, 可求得声源与麦克风阵列坐标系 X 轴正向的夹角 α:

$$\alpha = \arccos\frac{d_1}{l} = \arccos\frac{c\arg\max R_{12}^{cc}(\tau)}{l} \tag{7}$$

同理, 可求出 $M3$、$M4$ 到声源距离的差和声源与麦克风阵列坐标系 Y 轴正向的夹角 β. 根据 d_1 和 d_2 的正负号可确定声源所在的象限.

为了得到较为精确的角度值 θ, 按照式 (8) 融合 α 和 β[28]:

$$\theta = 0.5(\sin^2\alpha + \cos^2\beta)\alpha + 0.5(\cos^2\alpha + \sin^2\beta)(90^\circ - \beta) \tag{8}$$

2) 声源距离估计

考虑到无线信号的传播速度远远大于声音的传播速度, 故而在作为声源的机器人发声时, 通过机载的无线通信模块将一个字节的声音起始标志广播给此时处于定位状态的其他机器人. 处于定位状态的机器人接收到声音起始标志位, 开始对声音信号进行采集, 并记当前时刻为 t_{00}, 由于无线模块发送起始标志以及蜂鸣器由控制到发声, 存在一个固定的延时 τ_0, 故蜂鸣器真正开始发声的时刻 $t_0 = t_{00} + \tau_0$. 设 4 个麦克风 $M1$、$M2$、$M3$ 和 $M4$ 采集的数据分别为 $x_1(n)$、$x_2(n)$、$x_3(n)$ 和 $x_4(n)$, 为了降低噪声的干扰, 首先选取其中峰值最高的一个, 同时选取其中峰值最低的一个, 记:

$$x(n) = x_{\max}(n) - x_{\min}(n) \tag{9}$$

当 $x(n)$ 的绝对值大于一个阈值后, 则此时对应的时间为接收声音信号的起始时间点. 此阈值是根据多次试验确定的一个固定值. 式 (9) 中计算出的数据可以降低甚至消除噪音对声音起始点判断的影响, 同时计算不会改变起始点的位置. 利用固定阈值法判断出声音信号的起始位置, 则可求得声音从声源到达麦克风的时间:

$$t_s = \frac{m_s}{f_s} \tag{10}$$

其中, f_s 为声音信号采样频率.

此时, 可求得声源到 4 个麦克风 $M1$、$M2$、$M3$ 和 $M4$ 中离声源最近的一个麦克风的距离:

$$s' = ct_s \tag{11}$$

根据声源相对于阵列的角度 θ、s' 和该麦克风在阵列中的位置, 可以很容易求得声源到麦克风阵列中心的距离 s.

1.2　协作定位

协作定位是确定机器人声音收发状态和进行坐标换算的方法. 为保证实时性, 在整个相对定位过程中, 应该尽量用最少数量的机器人发声以实现相对定位.

定理 1. 假设二维空间中, 存在多个坐标原点及 X 轴朝向未知的独立直角坐标系. 若此空间中存在任意两个点, 其相对于上述所有坐标系的坐标值已知, 则空间中所有坐标系相互之间可进行坐标变换.

证明. 见附录. □

引理 1. 在不大于声音传感器探测范围的区域内, 存在多个装有相对定位模块的机器人, 若其中不少于两个机器人相继作为声源存在, 则区域中的任一机器人都能够通过计算得到其他机器人在其坐标系下的坐标.

注 1. 引理 1 中的相对定位模块包括一个蜂鸣器、四个麦克风及两个无线通信模块. 如引理 1 中所述, 应用相对定位模块, 在不大于其声音传感器探测范围的区域内, 两个机器人相继作为声源存在, 则根据第 1.1 节, 其他机器人可以分别算出两个发声机器人在它们自身坐标系下的坐标, 两个发声机器人中的任一个也可以得到另一个的坐标和自身在其坐标系下的坐标 (详见下述定位方法中的描述), 至此符合定理 1 中的已知条件. 则由定理 1 可知, 引理 1 中多个机器人自身坐标系相互之间可以进行坐标转换. 另外, 由于各个机器人的坐标系都是以机器人中心为坐标原点, 所以只需根据定理 1 证明过程中的式 (A1) 和 (A2) 求出坐标平移量, 并把式 (A3) 和 (A4) 已知坐标 (式右边的坐标值) 赋为 (0, 0) 即可计算出两个机器人在相互坐标系中的坐标值. 根据定理 1 可以推广到区域内的所有机器人, 故引理 1 成立.

对于单个机器人而言, 机器人存在两种工作状态: 声源状态和定位状态. 在相对定位区域中, 有一个机器人处于声源状态 (相对定位模块上的蜂鸣器发声), 则区域内的其他机器人作为定位状态存在. 由于一个定位周期内, 需要两个机器人相继发声才能完成定位, 故而如果机器人在某一个时刻作为声源, 则在发声完毕后, 其状态需要转化为定位状态, 故而这类机器人定义为功能切换机器人; 同时定义其他机器人为一般机器人.

以图 2 所示的 5 个机器人为例说明相对位姿的计算方法. 具有声音收发功能的 5 个机器人 $R1 \sim R5$ 随机分布在一个区域中, 每个机器人的朝向和位置相对于区域中其他机器人均未知. 相对位姿计算的方法可以描述为:

首先, 机器人 $R1$ 作为声源发声, 机器人 $R2$, $R3$, $R4$ 和 $R5$ 通过声源定位算法 (见第 1.1 节) 分别得到声源 ($R1$) 在其坐标系下的坐标 $P_{21}(x_{21}, y_{21})$, $P_{31}(x_{31}, y_{31})$, $P_{41}(x_{41}, y_{41})$ 和 $P_{51}(x_{51}, y_{51})$, 并且每个机器人分别通过自身携带的无线通信模块广播自身 ID 及 $R1$ 在其坐标系下的坐标, 随后分别接收广播信息; 其次, 机器人 $R3$ 作为声源发声, 同理, 机器人 $R1$, $R2$, $R4$ 和 $R5$ 分别得到声源 ($R3$) 在其坐标系下的坐标 $P_{13}(x_{13}, y_{13})$, $P_{23}(x_{23}, y_{23})$, $P_{43}(x_{43}, y_{43})$ 和 $P_{53}(x_{53}, y_{53})$, 每个机器人分别广播自身 ID 和 $R3$ 在其坐标系下的坐标, 随后分别接收广播信息.

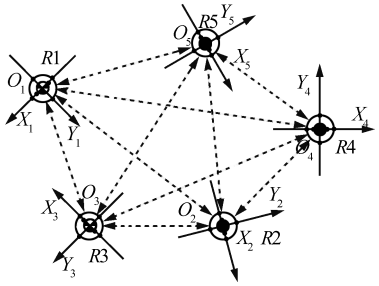


图 2　多机器人相对定位

Fig. 2　Multi-robot relative localization

经过上述两个过程, 机器人 $R1, R2, R3, R4$ 和 $R5$ 都可得到如下坐标信息: $P_{21}(x_{21}, y_{21})$, $P_{31}(x_{31}, y_{31})$, $P_{41}(x_{41}, y_{41})$, $P_{51}(x_{51}, y_{51})$, $P_{13}(x_{13}, y_{13})$, $P_{23}(x_{23}, y_{23})$, $P_{43}(x_{43}, y_{43})$ 和 $P_{53}(x_{53}, y_{53})$.

对于上述功能切换机器人 $R1$ 和 $R3$ 而言, 其缺失的是机器人 $R2$, $R4$ 和 $R5$ 在其各自坐标系下的坐标; $P_{11}(x_{11}, y_{11})$ 和 $P_{33}(x_{33}, y_{33})$ 为机器人 $R1$ 和机器人 $R3$ 分别在其自身坐标系下的坐标, 故有 $x_{11} = y_{11} = x_{33} = y_{33} = 0$.

记 $\boldsymbol{Q} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$ 为坐标 $P(x, y)$ 的向量表示. 考虑机器人 $R1$, 根据机器人 $R1$ 所接收到的坐标数据和注 1, 得:

$$\boldsymbol{Q}_{12} = \boldsymbol{Q}_{13} - \begin{bmatrix} \cos\gamma_1 & -\sin\gamma_1 \\ \sin\gamma_1 & \cos\gamma_1 \end{bmatrix} \boldsymbol{Q}_{23} = \boldsymbol{Q}_{11} - \begin{bmatrix} \cos\gamma_1 & -\sin\gamma_1 \\ \sin\gamma_1 & \cos\gamma_1 \end{bmatrix} \boldsymbol{Q}_{21} \tag{12}$$

式中, γ_1 表示机器人 $R2$ 的坐标系相对于机器人 $R1$ 的坐标系旋转的角度, 表示为

$$\gamma_1 = \begin{cases} \arccos(\rho_1), & (\boldsymbol{Q}_{21} - \boldsymbol{Q}_{23})(\boldsymbol{Q}_{11} - \boldsymbol{Q}_{13}) < 0 \\ -\arccos(\rho_1), & \text{否则} \end{cases} \tag{13}$$

其中, $\rho_1 = \frac{(\boldsymbol{Q}_{11} - \boldsymbol{Q}_{13}) \cdot (\boldsymbol{Q}_{21} - \boldsymbol{Q}_{23})}{|\boldsymbol{Q}_{11} - \boldsymbol{Q}_{13}||\boldsymbol{Q}_{21} - \boldsymbol{Q}_{23}|}$.

至此, 机器人 $R1$ 可得到 $P_{12}(x_{12}, y_{12})$; 根据式 (12) 和其他接收到的信息, 可求得 $P_{14}(x_{14}, y_{14})$ 和 $P_{15}(x_{15}, y_{15})$, 从而机器人 $R1$ 可以得到机器人 $R2$, $R3$, $R4$ 和 $R5$ 在其自身坐标系下的坐标. 同理, 可求得机器人 $R1$, $R2$, $R4$ 和 $R5$ 在机器人 $R3$ 坐标系下的坐标.

对于一般机器人 $R2$, 其缺失的是机器人 $R4$ 和 $R5$ 在其坐标系的坐标 $\boldsymbol{Q}_{24}$ 和 $\boldsymbol{Q}_{25}$. 根据机器人 $R2$ 所接收到的坐标数据和注 1, 得:

$$\boldsymbol{Q}_{24} = \boldsymbol{Q}_{23} - \begin{bmatrix} \cos\gamma_2 & -\sin\gamma_2 \\ \sin\gamma_2 & \cos\gamma_2 \end{bmatrix} \boldsymbol{Q}_{43} = \boldsymbol{Q}_{21} - \begin{bmatrix} \cos\gamma_2 & -\sin\gamma_2 \\ \sin\gamma_2 & \cos\gamma_2 \end{bmatrix} \boldsymbol{Q}_{41} \tag{14}$$

式中, γ_2 表示机器人 $R4$ 的坐标系相对于机器人 $R2$ 的坐标系旋转的角度, 表示为

$$\gamma_2 = \begin{cases} \arccos(\rho_2), & (\boldsymbol{Q}_{41} - \boldsymbol{Q}_{43})(\boldsymbol{Q}_{21} - \boldsymbol{Q}_{23}) < 0 \\ -\arccos(\rho_2), & \text{否则} \end{cases} \tag{15}$$

其中, $\rho_2 = \frac{(\boldsymbol{Q}_{21} - \boldsymbol{Q}_{23}) \cdot (\boldsymbol{Q}_{41} - \boldsymbol{Q}_{43})}{|\boldsymbol{Q}_{21} - \boldsymbol{Q}_{23}||\boldsymbol{Q}_{41} - \boldsymbol{Q}_{43}|}$.

从而, 机器人 $R1$ 可得到 $P_{24}(x_{24}, y_{24})$. 根据式 (14) 和其他接收到的信息, 可求得 $\boldsymbol{Q}_{25}$, 从而机器人 $R2$ 可以得到机器人 $R1$, $R3$, $R4$ 和 $R5$ 在其自身坐标系下的坐标. 同理, 可分别求得机器人 $R2$ 和 $R5$ 在机器人 $R4$ 坐标系下的坐标 $\boldsymbol{Q}_{42}$ 和 $\boldsymbol{Q}_{45}$ 以及机器人 $R2$ 和 $R4$ 在机器人 $R5$ 坐标系下的坐标 $\boldsymbol{Q}_{52}$ 和 $\boldsymbol{Q}_{54}$. 至此, 相对定位完成.

1.3 相对定位实现步骤

根据上述的声源定位和协作定位方法, 设计基于声音的相对定位实现流程:

步骤 1. 初始化: 在多个机器人组成的网络中, 随机设置一个机器人 i 为发声机器人;

步骤 2. 机器人 i 发声, 网络中其他每一个机器人利用声源定位算法 (见第 1.1 节) 计算出机器人 i 在其坐标系下的坐标, 并使用通信模块广播该坐标;

步骤 3. 机器人 i 根据接收到的相对坐标, 选择与自身距离最近的机器人 f 的位置, 然后传递发声标志给该机器人;

步骤 4. 机器人 f 发声, 网络中其他每一个机器人利用声源定位算法计算出机器人 f 在其坐标系下的坐标, 并使用无线通信模块广播该坐标;

步骤 5. 网络中的所有机器人, 按照协作定位算法中所述 (见第 1.2 节), 独立计算出传感区域内的所有机器人在其坐标系下的坐标;

步骤 6. 完成相对定位, 把机器人 f 设置为机器人 i, 转步骤 1, 从而进行下个周期的相对定位.

2 实验与分析

2.1 实验设置

图 3 所示为本课题组自行设计与研发的安装有相对定位模块的差速驱动小型移动机器人 MICE (Multi-robot for intelligent cooperative exploration).

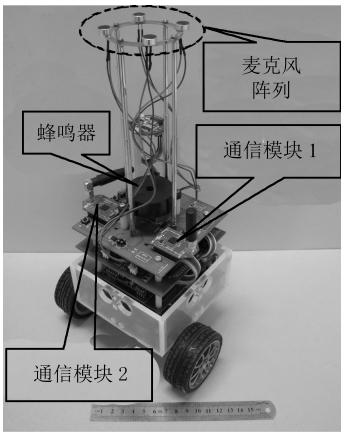


图 3 安装相对定位模块的 MICE 机器人

Fig. 3 MICE robot with relative localization module

相对定位装置中 "十" 字形排列的全向麦克风如图 3 所示, 此处用来采集声音信号 (图 3 所示 MICE 机器人上的朝向与图 1 构建的模型 X 轴正方向存在着一个角度差, 实际应用中需将第 1.1 节声源定位求取的角度减去 135°).

对不同频率的蜂鸣器测试发现, 压电式蜂鸣器从发声到声音到达峰值需要经过至少 10 个周期, 此 10 个周期的时间表示为 t_{ss}, 此处称之为上升时间. 如图 3 所示的安装方式, 受蜂鸣器体积和相对定位模块几何尺寸限制, 蜂鸣器的频率选择在 1.7 ~ 3.4 kHz 之间, 则上升时间 t_{ss} 最长为 5.8 ms.

在实验中, 选择蜂鸣器的频率为 2.7 kHz, 响度为 95 dB/10 cm, 故而可得该麦克风阵列直径在 6.37 cm ($\lambda/2$) 以内 (实际选择为 5 cm). 同时选择声音的采样频率为 160 kHz, 采样点数为 4 000 个, 则蜂鸣器的上升时间为 3.7 ms, 采样时间仅为 18.75 ms.

多个机器人进行相对定位的过程中, 无线通信模块 1 用来同步机器人发声模块和声音接收模块. 对于处于接收状态的机器人, 启用无线通信模块 2, 用来传递当前声源在其坐标系下的坐标.

图 4 给出了 6 个 MICE 机器人及室外实验场景.

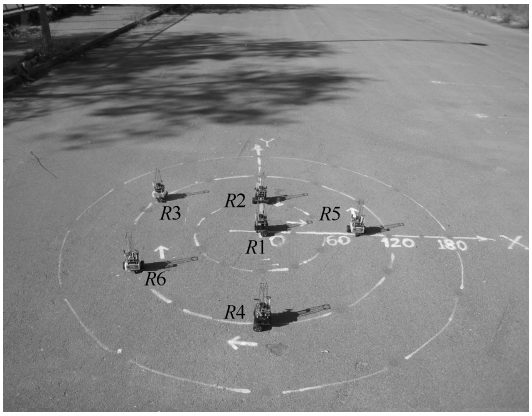


图 4　室外实验场地

Fig. 4　Outdoor experimental field

2.2　声源定位实验

声源定位包括声源方向估计和声源距离估计. 此实验只使用两个安装相对定位模块的 MICE 机器人, 其中一个作为声源, 一个作为定位机器人. 在声源方向的估计中, 被测点分布在半径为 60 cm, 120 cm 和 180 cm 的圆上, 且每隔 30° 设置一个测试点. 测试过程中, 作为定位节点的机器人固定, 作为声源的机器人的位置在不同测试点之间变换, 且每个测试点进行 20 次测试. 在声源距离测试实验中, 作为定位节点的机器人放于坐标原点, 作为声源的机器人分别距离定位节点 40 cm, 60 cm, 80 cm, 100 cm, 120 cm, 140 cm, 160 cm, 180 cm, 200 cm, 250 cm 和 300 cm 的一条直线上.

图 5 给出了声源角度的估计误差 (Errorbar 表示标准差). 可以看出, 处于不同距离的测试点, 估计角度的平均误差基本一致. 误差均值在 3° 以内上下波动, 且每个测试点的标准差不大于 2°; 3° 的误差波动说明有较好的定位精度, 2° 的标准差说明角度估计结果比较稳定, 不易受环境噪声的干扰.

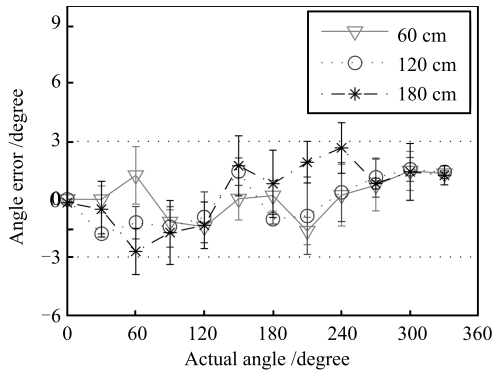


图 5　声源角度估计误差

Fig. 5　Estimation errors of sound-source angle

根据式 (7) 给出的角度计算公式, 角度估计的精度受信号采样精度的影响, 而采样频率决定采样的精度. 设声波的采样频率为 f_s, 声音频率是 f_a, 则一个声音周期采样的点数为 $n_T = \frac{f_s}{f_a}$, 则每个点表示的距离 $d_{i_s} = \frac{c}{n_T f_a} = \frac{c}{f_s}$ (c 为声速), 故可分辨的角度大小为

$$\Delta\alpha = \Delta\beta = \left|\left(\arccos\frac{d}{l}\right)'\right| d_{i_s} = \frac{1}{\sqrt{l^2-d^2}} d_{i_s} \tag{16}$$

则可知采样频率越高, 可分辨角度越小, 角度的估计越精确. 此处单路声音信号的采样频率为 160 kHz, 声速选择为 344 m·s^{-1}, 通过式 (8) 的融合公式可以使得最终的角度精度 $\Delta\theta < 3°$. 若设定采样频率为 320 kHz, 其他条件不变则通过式 (8) 的融合公式可以使得最终的角度精度 $\Delta\theta < 2°$. 这说明通过提高采样频率可以提高角度估计的精度.

图 6 给出了声源距离的估计误差 (Errorbar 表示标准差). 结果表明, 不同距离估计的平均误差在 14 cm 内上下波动, 且标准差不大于 15 cm; 随着距离的增大, 距离估计的误差上下波动的幅度也在增大; 另外距离在 40 cm ∼ 140 cm 之间估计更精确, 误差平均值在 10 cm 之内上下波动.

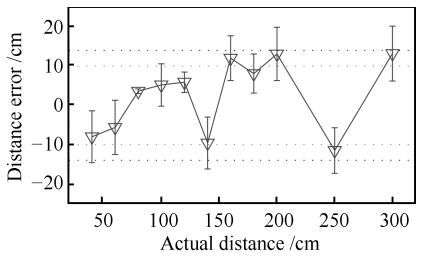


图 6　声源距离估计误差

Fig. 6　Estimation errors of sound-source distance

经过多次的实验, 表明声源定位算法在 1 s 能够完成 3 次.

2.3　室外相对定位实验

此处, 使用 6 个装有相对定位模块的 MICE 机器人随机摆放在直径为 300 cm 的圆形室外环境中进行实验 (见图 4). 根据第 1 节中的叙述, 相对定位一方面需要以声源定位为基础, 另一方需要考虑机器人间的数据传递与协调. 无线通信模块 2 用来对机器人进行组网, 此处采用基于 CC2430 的无线通信模块组成简单的令牌环网来完成. 根据相对定位算法中的描述, 一次相对定位需两个机器人先后发声, 并进行两次声源定位, 模块 2 要完成两个通信周期. 经过测试, 针对 6 个机器人, 完成一个通信周期 (令牌在 6 个机器人循环一次) 仅 80 ms; 且整个相对定位可在 1 s 中完成, 能满足机器人定位的实时性要求.

为了对实验结果进行评价, 机器人 $R1 \sim R6$ 在每次相对定位结束后通过无线通信模块 2 组成的令牌环网依次上传自身的定位结果. 为了避免相对定位结果上传到上位机时与定位过程中定位数据传输的冲突, 此处调整相对定位的周期, 选择 7 s 进行一次相对定位.

图 7 中数据是于 50 个定位周期 (即 350 s) 采集的 $R1$ 的定位结果. 另外, 此处使用真实坐标值与相对定位测算值之间的距离大小来表征相对定位误差.

图 7 (a) 给出了 50 次机器人 $R1$ 定位出的其他 5 个机器人的坐标. 从图上可以看出 $R1$ 对 $R2$、$R3$ 和 $R5$ 的定位效果较好. 这是因为, 在整个定位过程中, 由于 $R1$ 和 $R2$ 相互之间的距离是最近的, 根据第 1.3 节中的算法, $R1$ 和 $R2$ 始终作为发声机器人存在. 所以 $R1$ 对 $R2$ 的定位误差等于声源定位的误差. $R3$ 和 $R5$ 到两个声源 $R1$ 和 $R2$ 的距离差别不大, 故而其定位效果比较好. 而机器人 $R4$ 和 $R6$ 不但距离作为公共点的发声机器人 $R1$ 和 $R2$ 较远, 而且到 $R1$ 的距离和到 $R2$ 的距离差较大, 这是导致最后定位的误差较大的主要原因; 另外 $R1$ 对 $R4$ 和 $R6$ 进行多次相对定位的结果呈圆弧分布也充分说明了与发声机器人距离增大后, 声源定位的误差对相对定位角度误差的影响较为明显. 表 1 中的数据表示 6 个机器人在自身坐标系下分别对其他 5 个机器人定位的误差均值和标准差.

从图 7 (b)、7 (c) 和表 1 中可以看出, 图中所示的 300 cm 范围内相对定位的误差平均值不大于 16 cm, 标准差不大于 20 cm.

需要说明的是, 该实验中发声机器人与其他机器人的最大距离不超过 300 cm, 根据声源定位中的分析, 当角度精度为 3° 且距离 300 cm 时, 会产生位置误差的最大幅度为: $\Delta A = 2 \times 300\,\text{cm} \times \sin(3/2) \approx 15.71\,\text{cm}$, 此值在相对定位误差范围内.

根据实验结果可以看出, 相对定位的距离平均误差和标准差都可以保持在较小的范围内, 可以满足多机器人定位的需求.

2.4 室内相对定位实验

在上述的室外环境中, 由于定位区域比较开阔, 声音反射信号对定位结果没有影响. 但是为了泛化本文中的方法, 此处分析所提方法在室内环境中应用的可能性.

1) 声音反射对声源定位影响分析

在室内环境中, 考虑到环境中障碍物有可能与声音发射和接收机器人的距离比较近, 反射的声波会被采集到, 影响机器人对声源的定位结果. 在对声源距离的估计中, 因反射声波不会改变声音到达的起始点, 因此反射声波不影响对声源的距离估计. 但是, 反射声波会改变声音信号的幅值, 进而改变波形的形状, 对声源方位的估计会产生较大的影响. 下面对有反射情况下的声源距离与方位估计进行实验和分析.

实验环境如图 8 所示, 图中反射面较光滑, 可有效对声音进行反射, Rs 表示发声机器人, Rr 表示接收声音的机器人, 且从反射面到机器人 Rr 这段距离内两个箭头所指方向 200 cm 范围内无障碍物 (注: 在下面的实验中, 如无特殊说明, Rr 总是朝向声源, 即 Rs 始终位于 Rr 的 0° 方向).

实验设置中给出蜂鸣器的频率为 2.7 kHz, 对应的上升时间为 $t_{ss} = 3.7$ ms, 根据实际测试下降时间约为上升时间的 2 倍. 要使反射声音信号与原声音信号无叠加, 则 Rr 或 Rs 与反射面之间的距离须大于 $d_s = \frac{3}{2} c t_{ss} = 190.92$ cm (c 表示声速). 图 9 给出了在图 8 实验环境下, Rs 与 Rr 的摆放位置.

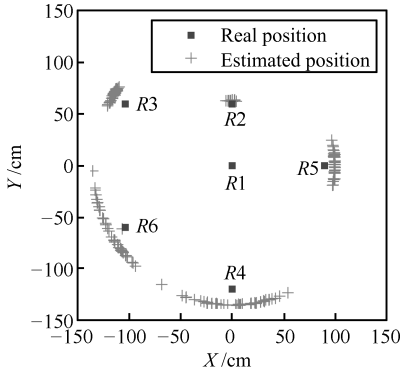
首先, 分析声音反射对声源距离估计的影响. 令图 9 (a) 中 D 分别设为 200 cm $>$ 190.92 cm (反射声波与原声波信号无叠加) 和 30 cm $<$ 190.92 cm (反射声波与原声波信号有叠加) 两种情况. 两种情况

表 1 室外 6 个机器人相对定位的结果

Table 1 The outdoor relative localization outcome of six robots

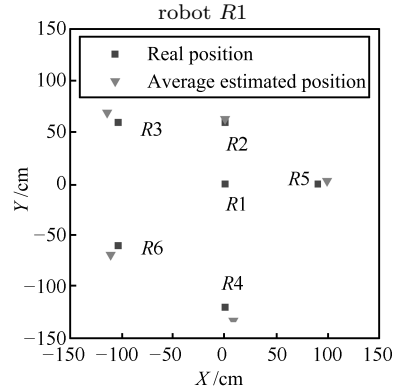
	C_{R1}		C_{R2}		C_{R3}		C_{R4}		C_{R5}		C_{R6}	
	D_ε	D_σ	D_ε	D_σ	D_ε	D_σ	D_ε	D_σ	D_ε	D_σ	D_ε	D_σ
$R1$	0,	0	6.65,	4.19	8.36,	1.76	10.92,	4.56	4.88,	0.82	8.67,	6.29
$R2$	3.25,	0.91	0,	0	10.08,	3.73	12.37,	4.34	6.84,	5.38	11.64,	5.46
$R3$	14.21,	1.15	6.72,	5.06	0,	0	15.42,	12.67	10.87,	4.52	15.96,	14.17
$R4$	15.12,	8.69	14.74,	10.51	13.93,	6.75	0,	0	13.84,	11.46	9.47,	16.61
$R5$	9.94,	3.69	10.11,	6.19	12.99,	7.67	10.18,	9.43	0,	0	10.18,	7.35
$R6$	12.17,	18.92	13.50,	7.34	13.17,	17.44	10.81,	8.19	13.64,	12.06	0,	0

注: 表中 $C_{R1} \sim C_{R6}$ 对应机器人 $R1 \sim R6$ 的坐标系, 结果为定位误差均值 D_ε 和标准差 D_σ (cm).



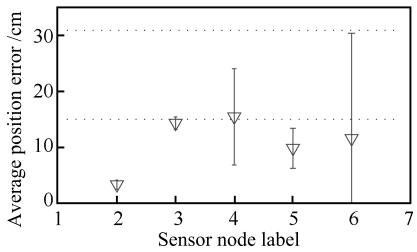
(a) 机器人 $R1$ 相对定位坐标分布

(a) The relative localization coordinate distribution in robot $R1$



(b) 机器人 $R1$ 相对定位均值分布

(b) The mean relative localization coordinate distribution in robot $R1$



(c) 相对定位误差均值

(c) The mean error of relative localization

图 7　室外环境中机器人 $R1$ 相对定位结果

Fig. 7　The relative localization result of robot $R1$ in an outdoor environment

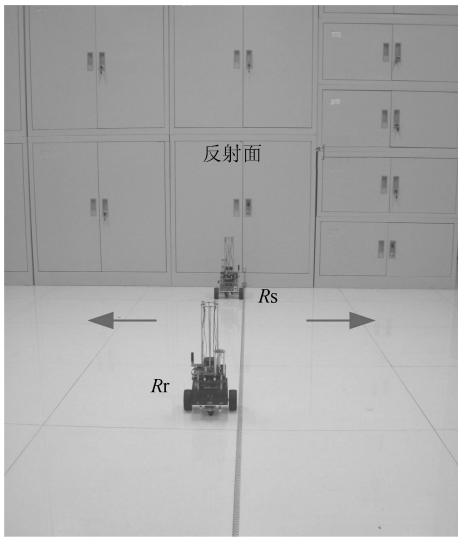


图 8　室内声音反射实验环境

Fig. 8　Indoor environment for sound reflection experiments

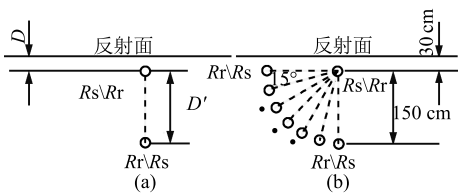


图 9　声音反射实验中机器人位置

Fig. 9　Robot location in sound reflection experiments

下在 $D' = 220\,\text{cm}$, $300\,\text{cm}$ 时的距离估计结果为 213.35 cm, 314.43 cm 和 214.23 cm, 309.10 cm. 图 10 给出 $D' = 220\,\text{cm}$ 时两种情况下的麦克风 $M1$ 与 $M3$ 输出波形. 实验证明在 $D' = 300\,\text{cm}$ 时, 仍能对距离进行正确的估计. 从图 10 中可以看出, 反射声波不影响采集到的声音信号的起始点, 因此声波反射对距离估计没有影响 (注: 在声音信号采集的过程中, 采样的点数增加到 5 000 个).

其次, 分析声音反射对声源方位估计的影响. 为了使实验效果明显, 图 9 (a) 中, 分别选择 D 的距离

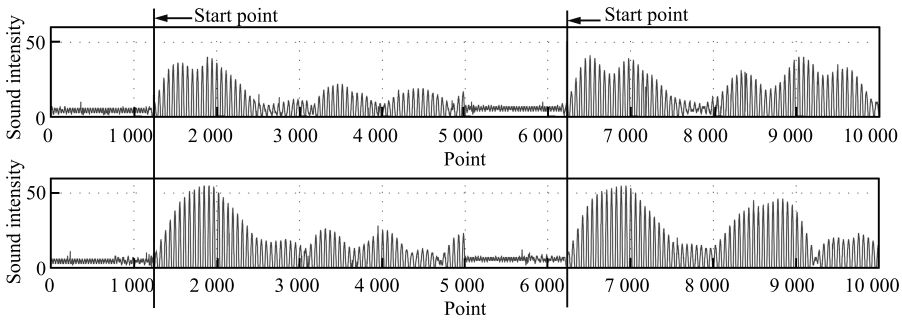


图 10　室内两种不同情况下麦克风 $M1$ 和 $M3$ 接收到的数据

Fig. 10　Data recorded by the microphones $M1$ and $M3$ in the two different cases

为 30 cm 和 200 cm, $D^{'}$ 选择为 60 cm, 上述两种情况下进行 10 组方位估计实验, 得到的角度均值和标准差分别为 1.01°, 2.32° 和 2.51°, 0°. 从实验结果中可以得出, Rr 与 Rs 连线与反射面垂直时, 对声源方向的估计没有本质影响. 另外, 设置 D 固定为 200 cm (大于 190.92 cm), $D^{'}$ = 220 cm, 则得到的角度估计值为 56.13° (真值为 0°). 这说明 Rr 与 Rs 的距离增大到 220 cm, 即使在原声波与反射声波没有叠加时, 也不能实现正确定向.

最后, 分析 Rr 与 Rs 的连线与反射面呈不同角度时对声源定位的影响. 如图 9 (b) 所示, Rr 与 Rs 的距离为 150 cm, 实验中此角度从 0° 每隔 15° 变化到 90°, 对每个角度进行 10 次实验, 得到声源距离和方向估计结果并求取均值和标准差. 在测试过程中, 调整 Rr 保证 Rs 在 Rr 的零度方向, 定位结果如表 2 所示. 从表 2 的结果可以看出, 声源距离估计可以维持在一个稳定的范围内. 这说明不同角度的声音反射对声源距离的估计没有影响. 随着 Rr 与 Rs 连线与反射面角度的增大 (直到 90°), 声音反射对声源方位估计的影响不断减小.

2) 室内多机器人相对定位实验

类似于室外定位场景, 室内实现场景如图 11 所示, 实验机器人由 6 个随机分布的 MICE 机器人组成, 图中箭头表示机器人的朝向. 在图 11 所示的室内环境中, 包含在定位拓扑内的所有机器人到墙面或者体积较大障碍物的距离大于 190.92 cm. 拓扑内部没有除机器人之外的其他障碍物, 且发声机器人到所有接收声音信号机器人的距离 $\leq$ 200 cm. 50 次相对定位实验结果 (定位误差的平均值和标准差) 如表 3 所示. 对比表 1 和表 3 发现, 室内环境中定位误差的平均值维持在 16 cm 之内, 但是定位误差的标准差却得到了很大的改善, 可以减小到 12 cm 之内, 且多数点的误差标准差可以在 10 cm 之内. 这主要是因为室内环境相对较安静、噪声较小, 减少了对声音定位的干扰.

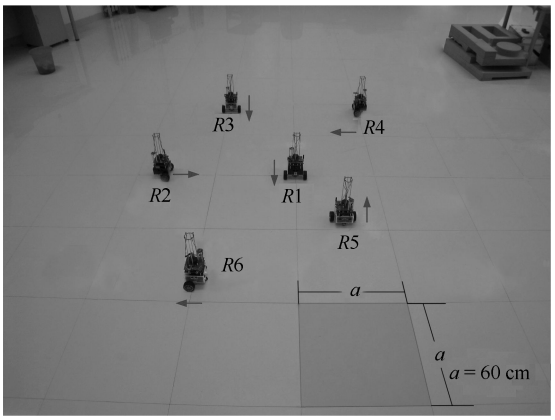


图 11 室内实验场地

Fig. 11 Indoor experiment area

表 2 不同角度声音反射实验结果

Table 2 Experimental results corresponding to different angles of sound refection

	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Angle$\left(\overline{\theta}, \theta_\sigma\right)$(°)	5.34, 1.13	4.59, 1.11	4.36, 0.96	4.31, 0.75	3.45, 3.08	2.56, 1.07	2.34, 1.17
Distance$\left(\overline{d}, d_\sigma\right)$(cm)	151.6, 5.17	149.8, 5.28	149.9, 5.86	150.0, 5.83	155.3, 5.91	155.7, 5.74	155.6, 4.86

注: 表中 $\overline{\theta}, \theta_\sigma$ 分别表示定向的均值和标准差; $\overline{d}, d_\sigma$ 分别表示测距的均值和标准差.

表 3 室内 6 个机器人相对定位的结果

Table 3 The indoor relative localization outcome of six robots

	C_{R1}		C_{R2}		C_{R3}		C_{R4}		C_{R5}		C_{R6}	
	D_ε	D_σ	D_ε	D_σ	D_ε	D_σ	D_ε	D_σ	D_ε	D_σ	D_ε	D_σ
$R1$	0,	0	9.21,	2.44	9.09,	1.11	7.76,	1.30	10.55,	5.20	11.81,	1.24
$R2$	11.84,	6.99	0,	0	14.46,	7.47	13.51,	5.09	13.24,	5.33	8.80,	7.22
$R3$	8.56,	5.70	13.86,	7.71	0,	0	11.61,	7.90	11.32,	3.63	15.00,	5.21
$R4$	14.68,	9.20	14.82,	7.11	14.09,	11.41	0,	0	10.31,	0.62	14.03,	5.11
$R5$	7.80,	0.35	9.47,	5.89	12.41,	1.33	15.82,	8.39	0,	0	5.24,	1.87
$R6$	12.68,	2.39	8.97,	7.49	14.31,	4.31	12.23,	3.84	4.61,	3.61	0,	0

注: 表中 $C_{R1} \sim C_{R6}$ 对应机器人 $R1 \sim R6$ 的坐标系, 结果为定位误差均值 D_ε 和标准差 D_σ (cm).

3　结论

本文给出了一种基于声音的分布式相对定位方法, 并利用简单的发声器、麦克风阵列和无线通信模块构建了一款结构简单、价格低廉、精度较高且实时性好的二维空间声音相对定位装置. 这种装置体积较小, 也可适用于传感器网络节点之间的相对定位.

文中提出的分布式声音相对定位方法与装置, 一方面可有效防止单个机器人的损坏带来的定位失效, 这是因为所有的机器人在整个系统中是对等的; 另一方面, 可以有效地用于各种分布式估计算法中的位置信息获取, 这是因为所有的定位装置可以根据需要选择得到自己附近机器人的位置.

由于在运动过程中, 机器人的朝向可能出现瞬间的变化, 且机器人的相对定位滞后于机器人的运动, 故目前在使用本文方法定位过程中, 机器人需保持静止. 受限于现有蜂鸣器的较小发声强度, 本文目前只在 300 cm 的范围内对所提方法进行了实验验证. 若可定制发声强度较大的蜂鸣器或者在适当牺牲实时性基础上优化机器人之间的拓扑, 则本文中的方法将获得更大的应用范围, 而后者是将来工作的重点.

附录

定理 1 的证明. 定理 1 可表述为已知二维空间中两点 P_i, P_j 在 c 个不同坐标系 $X_1O_1Y_1$, $\cdots$, $X_mO_mY_m$, $\cdots$, $X_nO_nY_n$、$\cdots$, $X_cO_cY_c$ 下的坐标 $P_{1i}(x_{1i}, y_{1i})$, $P_{1j}(x_{1j}, y_{1j})$, $\cdots$, $P_{mi}(x_{mi}, y_{mi})$, $P_{mj}(x_{mj}, y_{mj})$, $\cdots$, $P_{ni}(x_{ni}, y_{ni})$, $P_{nj}(x_{nj}, y_{nj})$, $\cdots$, $P_{ci}(x_{ci}, y_{ci})$, $P_{cj}(x_{cj}, y_{cj})$, 则坐标系 $X_1O_1Y_1$, $\cdots$, $X_mO_mY_m$, $\cdots$, $X_nO_nY_n$, $\cdots$, $X_cO_cY_c$ 之间可以相互转换.

考虑 c 个坐标系中的任意两个坐标系 $X_mO_mY_m$ 和 $X_nO_nY_n$, 如图 A1 (a) 所示, 如果能够求得两坐标系之间的 X 轴偏移量 h、Y 轴偏移量 k 和旋转角 γ, 则可证坐标系 $X_mO_mY_m$ 和 $X_nO_nY_n$ 相互之间可进行坐标转换.

令点 $P_{mi}(x_{mi}, y_{mi})$, $P_{mj}(x_{mj}, y_{mj})$, $P_{ni}(x_{ni}, y_{ni})$ 及 $P_{nj}(x_{nj}, y_{nj})$ 的坐标分别用向量 $\boldsymbol{Q}_{mi}$, $\boldsymbol{Q}_{mj}$, $\boldsymbol{Q}_{ni}$ 及 $\boldsymbol{Q}_{nj}$ 表示. $\overrightarrow{P_{mi}P_{mj}}$ 和 $\overrightarrow{P_{ni}P_{nj}}$ 是 $\overrightarrow{P_iP_j}$ 在不同坐标系下的表示, 故而 $\overrightarrow{P_{mi}P_{mj}}$ 和 $\overrightarrow{P_{ni}P_{nj}}$ 的差异是由坐标的旋转和平移而造成的. 根据空间向量的性质可知, 坐标轴的平移并不能改变向量的方向, 故可知 $\overrightarrow{P_{ni}P_{nj}}$ 到 $\overrightarrow{P_{mi}P_{mj}}$ 的旋转角度与坐标系旋转的角度相同 (见图 A1), 即:

$$\gamma = \begin{cases} \arccos(\rho), & \overrightarrow{P_{mi}P_{mj}} \times \overrightarrow{P_{ni}P_{nj}} < 0 \\ -\arccos(\rho), & \text{否则} \end{cases} \tag{A1}$$

其中, $\rho = \frac{(\boldsymbol{Q}_{mi}-\boldsymbol{Q}_{mj})\cdot(\boldsymbol{Q}_{ni}-\boldsymbol{Q}_{nj})}{|\boldsymbol{Q}_{mi}-\boldsymbol{Q}_{mj}||\boldsymbol{Q}_{ni}-\boldsymbol{Q}_{nj}|}$, 故有:

$$\begin{pmatrix} h \\ k \end{pmatrix} = \boldsymbol{Q}_{mi} - \boldsymbol{Q}'_{ni} = \boldsymbol{Q}_{mj} - \boldsymbol{Q}'_{nj} \tag{A2}$$

其中,

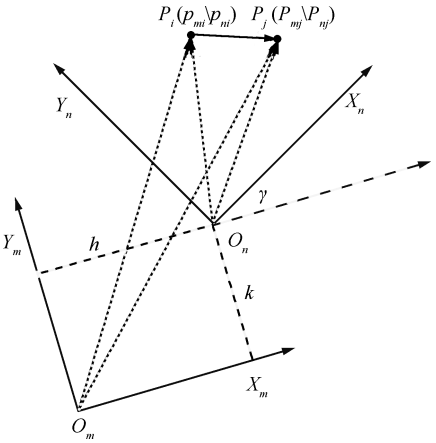
$$\begin{cases} \boldsymbol{Q}'_{ni} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma \\ \sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} \boldsymbol{Q}_{ni} \\ \boldsymbol{Q}'_{nj} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma \\ \sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} \boldsymbol{Q}_{nj} \end{cases}$$

则有:

$$\boldsymbol{Q}_{mi} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma \\ \sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} \boldsymbol{Q}_{ni} + \begin{pmatrix} h \\ k \end{pmatrix} \tag{A3}$$

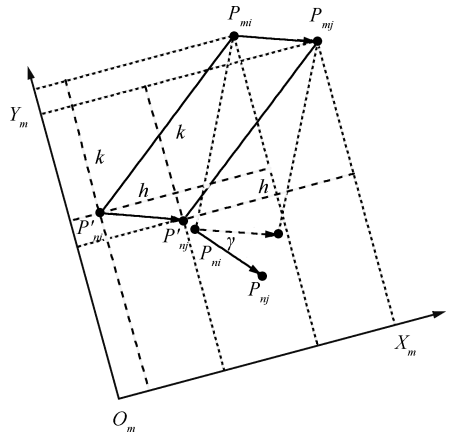
$$\boldsymbol{Q}_{ni} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma \\ -\sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} \left[\boldsymbol{Q}_{mi} - \begin{pmatrix} h \\ k \end{pmatrix} \right] \tag{A4}$$

同理可证坐标系 $X_1O_1Y_1$, $\cdots$, $X_mO_mY_m$, $\cdots$, $X_nO_nY_n$、$\cdots$, $X_cO_cY_c$ 两两之间都可以进行坐标变换, 则坐标系 $X_1O_1Y_1$, $\cdots$, $X_mO_mY_m$, $\cdots$, $X_nO_nY_n$、$\cdots$, $X_cO_cY_c$ 之间可以相互转换, 定理 1 得证. □



(a) 二维空间同一向量在不同坐标系中的表示

(a) A vector representation in different 2D frame



(b) 不同坐标系下的向量值在同一坐标系下的表示

(b) The vector value from the same vector in different frame representing in the same frame

图 A1 相对定位中的坐标变换

Fig. A1 Transformation of coordinates in relative localization

References

1 Turgut A E, Çelikkanat H, Gökçe F, Şahin E. Self-organized flocking in mobile robot swarms. *Swarm Intelligence*, 2008, **2**(2−4): 97−120

2 Ren W, Sorensen N. Distributed coordination architecture for multi-robot formation control. *Robotics and Autonomous Systems*, 2008, **56**(4): 324−333

3 La H M, Sheng W H. Distributed sensor fusion for scalar field mapping using mobile sensor networks. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2013, **43**(2): 766−778

4 Tu Zhi-Liang, Wang Qiang, Shen Yi. A distributed simultaneous optimization algorithm for tracking and monitoring of moving target in mobile sensor networks. *Acta Automatica Sinica*, 2012, **38**(3): 452−461
(涂志亮, 王强, 沈毅. 移动传感器网络中目标跟踪与监测的同步优化. 自动化学报, 2012, **38**(3): 452−461)

5 Pugh J, Raemy X, Facre C, Martinoli A. A fast onboard relative positioning module for multirobot systems. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2009, **14**(2): 151−162

6 Kim D J, Choi J S. Multi-robot team outdoor localization using active marker and high frequency signal sources. In: Proceedings of the 11th International Conference on Control, Automation and Systems. Gyeonggi-do, Korea (South): IEEE, 2011. 192−196

7 Rivard F, Bisson J, Michaud F, Letourneau D. Ultrasonic relative positioning for multi-robot systems. In: Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Pasadena, CA: IEEE, 2008. 323−328

8 Li Xiao-Fei, Liu Hong. A survey of sound source localization for robot audition. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2012, **7**(1): 9−20
(李晓飞, 刘宏. 机器人听觉声源定位研究综述. 智能系统学报, 2012, **7**(1): 9−20)

9 Agmon N, Fok C, Emaliah Y, Stone P. On coordination in practical multi-robot patrol. In: Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, River Centre. Saint Paul, MN: IEEE, 2012. 650−656

10 Li Wen-Bai, Liu Ming-Yong, Li Hu-Xiong, Chen Xue-Yong. Localization performance analysis of cooperative navigation system for multiple AUVs based on relative position measurements with a single leader. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(6): 724−736
(李闻白, 刘明雍, 李虎雄, 陈学永. 基于单领航者相对位置测量的多 AUV 协同导航系统定位性能分析. 自动化学报, 2011, **37**(6): 724−736)

11 Meng Q H, Yang W X, Wang Y, Zeng M. Collective odor source estimation and search in time-variant airflow environments using mobile robots. *Sensors*, 2011, **11**(11): 10415−10443

12 Wu Pei-Liang, Kong Ling-Fu, Kong Liang. A solution to simultaneous localization, calibration and mapping of ubiquitous robot system. *Acta Automatica Sinica*, 2012, **38**(4): 618−630
(吴培良, 孔令富, 孔亮. 一种普适机器人系统同时定位, 标定与建图方法. 自动化学报, 2012, **38**(4): 618−630)

13 Wang Jing-Chuan, Chen Wei-Dong, Cao Qi-Xin. Omnivision and odometer based self-localization for mobile robot. *Robot*, 2005, **27**(1): 41−45
(王景川, 陈卫东, 曹其新. 基于全景视觉与里程计的移动机器人自定位方法研究. 机器人, 2005, **27**(1): 41−45)

14 Wang Ke, Wang Wei, Zhuang Yan, Sun Chuan-Yu. Omnidirectional vision-based self-localization by using large-scale metric-topological 3D map. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(11): 1369−1378
(王珂, 王伟, 庄严, 孙传昱. 基于几何−拓扑广域三维地图和全向视觉的移动机器人自定位. 自动化学报, 2008, **34**(11): 1369−1378)

15 Tully S, Kantor G, Choset H. Leap-frog path design for multi-robot cooperative localization. *Field and Service Robotics*, 2010, **62**: 307−317

16 Roumeliotis S I, Bekey G A. Distributed multirobot localization. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, **18**(5): 781−795

17 Liu Lin, Liu Fei, Ji Xiu-Cai, Lu Hui-Min, Hai Dan, Zheng Zhi-Qiang. Distributed formation control for omnidirectional robots. *Robot*, 2007, **29**(1): 23−28
(柳林, 刘斐, 季秀才, 卢惠民, 海丹, 郑志强. 全向移动机器人编队分布式控制研究. 机器人, 2007, **29**(1): 23−28)

18 Moon W, Cho B S, Jang J W, Baek K R. A multi-robot positioning system using a multi-code ultrasonic sensor Network and a Kalman filter. *International Journal of Control, Automation, and System*, 2010, **8**(6): 1349−1355

19 Jiang Jian, Zhao Jie, Li Li-Kun. Sound-based collaborative direction estimation for swarm robotic systems. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(4): 385−390
(姜健, 赵杰, 李力坤. 面向群智能机器人系统的声音协作定向. 自动化学报, 2007, **33**(4): 385−390)

20 Valin J M, Michaud F, Rouat J, Letourneau D. Robust sound source localization using a microphone array on a

mobile robot. In: Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Las Vegas, NV: IEEE, 2003. 1228−1233

21 Knapp C, Carter G. The generalized correlation method for estimation of time delay. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1976, **24**(4): 320−327

22 Wang Q H, Ivanov T, Aarabi P. Acoustic robot navigation using distributed microphone arrays. *Information Fusion*, 2004, **5**(2): 131−140

23 Frampton K D. Acoustic self-localization in distributed sensor network. *IEEE Sensors Journal*, 2006, **6**(1): 166−172

24 Hahn W R. Optimum signal processing for passive sonar range and bearing estimation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1975, **58**(1): 201−207

25 Carter G. Variance bounds for passively locating an acoustic source with a symmetric line array. *Journal of Acoustical Society of America*, 1977, **62**(4): 922−926

26 Schmidt R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1986, **34**(33): 276−280

27 Wang H, Kaveh M. Coherent signal-subspace processing for the detection and estimation of angles of arrival of multiple wide-band sources. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1985, **33**(4): 823−831

28 Jia Rui-Wu, Shi Geng-Chen. Fast direction finding algorithm for four-acoustic sensor square planar array and its error analysis. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2009, **22**(A1): 1757−1762
(贾瑞武, 石庚辰. 四元声传感器面阵快速测向算法及误差分析. 传感技术学报, 2009, **22**(A1): 1757−1762)

吴玉秀 天津大学电气与自动化工程学院博士研究生. 主要研究方向为移动传感器网络, 机器人嗅觉.
E-mail: yuxiu_wu@163.com
(**WU Yu-Xiu** Ph. D. candidate at the School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University. Her research interest covers mobile sensor networks and robot olfaction.)

孟庆浩 天津大学电气与自动化工程学院教授. 主要研究方向为自主机器人感知, 导航与控制. 本文通信作者.
E-mail: qh_meng@tju.edu.cn
(**MENG Qing-Hao** Professor at the School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University. His research interest covers autonomous robot perception, navigation and control. Corresponding author of this paper.)

曾 明 天津大学电气与自动化工程学院副教授. 主要研究方向为计算机视觉, 机器人嗅觉, 数字图像处理.
E-mail: zengming@tju.edu.cn
(**ZENG Ming** Associate professor at the School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University. His research interest covers computer vision, robot olfaction, and digital image processing.)