

一种新型电网仓库物品管理算法

纪世雨

(解放军总医院第五医学中心, 北京 100039)

摘要: 射频识别标签具有体积小, 无需电源等特点; 它在电网设备管理中具有重大作用; 但现有的 RFID 定位系统存在需要专用设备, 仅能够实现二维平面定位以及移动定位精度不高, 可扩展性低等缺点; 在此利用商用机器人和 RFID 设备提出了一个移动 RF 机器人三维空间定位系统; 具体地说, 通过不同的相位构造的三元组, 可以得到不同精度的目标标签候选位置; 然后, 通过对偏差较小的定位结果赋予较大的权重, 最终获得精确度较高的定位结果; 此外通过利用目标标签与天线轨迹之间的几何关系, 可以将该方法扩展到三维空间; 通过实验结果表明, 所提出的系统在二维和三维定位中存在较小的误差, 大约为 12 cm。

关键词: 三维空间定位; 无线射频识别; 定位; 相位

A New Algorithm of Goods Management in Power Grid Warehouse

Ji Shiyu

(Fifth Medical Center, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100039, China)

Abstract: RFID tags have the characteristics of small size and no power supply. It plays a major role in the management of power grid equipment. However, the existing RFID positioning system has disadvantages such as requiring special equipment, only being able to achieve two-dimensional planar positioning, low mobile positioning accuracy, and low scalability. This paper proposes a mobile RF robot three-dimensional positioning system using commercial robots and RFID equipment. Specifically, through the triples of different phase structures, target tag candidate positions with different accuracy can be obtained. Then, by assigning greater weight to the positioning results with smaller deviations, the positioning results with higher accuracy are finally obtained. In addition, by using the geometric relationship between the target tag and the antenna track, the method can be extended to three-dimensional space. The experimental results show that the proposed system has a small error in two-dimensional and three-dimensional positioning, about 12 cm.

Keywords: 3D space position; RFID; localization; phase

0 引言

随着城市化的发展, 电力系统的负荷也越来越大, 因此需要扩大电力生产规模, 并及时替换损坏零件。为了提高维护生产工作的效率, 需要在库房以及生产厂房及时寻找和定位设备位置^[1]。但由于场地面积过大, 人工寻找效率过低, 因此需要采用一种智能方式, 对设备进行管理; 确定设备的位置。RFID 作为一种低功耗, 易部署的无线通讯手段, 非常适合对电力设备进行定位和管理^[2-8]。本研究通过将 RFID 设备与自动机器人相结合, 设计了一个 3D 空间多标签自动定位算法 (Multiple Tags by Robot and RFID, M2R)。利用该算法实现了对厂房中的设备自动定位和管理。

1 系统概述与背景知识

图 1 描述了一个典型的仓库场景, 一个机器人配备了一个 RFID 阅读器和几个部署的物品, 这些物品都被贴上无

源标签。

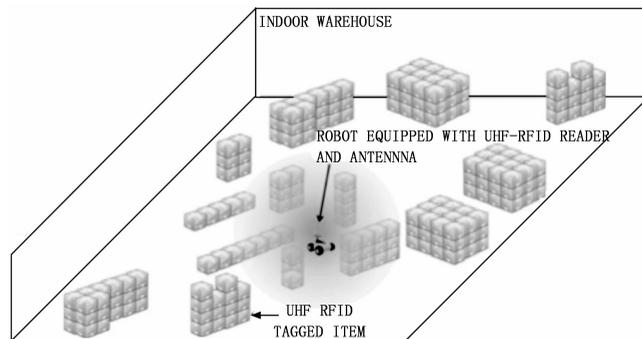


图 1 系统场景描述

1.1 RFID 相位获取

假设 RFID 阅读器接收到 n 个来自目标标签的标签号 id , 因此, 在原始相位剖面中有 n 个相位点: $P(id, t_1)$, $P(id, t_2)$, \dots , $P(id, t_n)$, 此时, 时间戳 t_1, t_2, \dots, t_n

收稿日期: 2020-01-13; 修回日期: 2020-08-21。

基金项目: 全国教育科学国防军事教育学科“十二五”规划教育部重点课题(DRA110425)。

作者简介: 纪世雨(1980-), 男, 河南鹤壁人, 学士, 主要从事军事高技术应用与管理与信息工程方向的研究。

引用格式: 纪世雨. 一种新型电网仓库物品管理算法[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(3): 181-186.

是按升序排列的, 即对于任何 $1 \leq i < j \leq n$, 存在 $t_i < t_j$ 。在此使用 $dis(id, t_i)$ 来表示时间 t_i 时阅读器的天线和标签 id 之间的距离。在后向散射通信中, 信号经过 $2 \times dis(id, t_i)$ 的总距离。除了在距离上的相位旋转之外, 阅读器的发射电路、标签的反射特性和阅读器的接收器电路还将引入一些附加的相位旋转, 分别表示为 $\theta_T, \theta_{TAG}, \theta_{[9-11]}$ 。RFID 阅读器返回的相位值 $P(id, t_i)$ 可以用公式 (1) 计算得到:

$$P(id, t_i) = \left[\frac{2 \times dis(id, t_i)}{\lambda} \times 2\pi + \Theta \right] \bmod 2\pi \quad (1)$$

这里, λ 是 RFID 信号的波长, 常数 θ 与硬件有关, 等于 $\theta_T + \theta_{TAG} + \theta_R$ 。

1.2 消除周期性跳跃

原始标签相位分布包括由于公式 (1) 中的 mod 操作而产生的周期性相位跳跃。这些相位跳变要么是从 0 左右的相位值到 2π 左右的后续相位值, 要么是从 2π 左右的相位值到 0 左右的后续相位值。当连续相位值之间的绝对相位跳变大于或等于默认跳变公差时, 可以使用类似于 Matlab 中的 unwrap 命令的方法^[12-14], 通过增加或减去 2π 的倍数来消除相位 $P(id, t_1), P(id, t_2), \dots, P(id, t_n)$ 中的相位跳变。利用这种方法, 可以消除 mod 运算的影响, 得到一个新的展开相位值序列: $P'(id, t_1), P'(id, t_2), \dots, P'(id, t_n)$ 。具体地说, 在展开的相位中, 任意一个相点 $P'(id, t_i)$ 可以通过公式 (2) 表示:

$$P'(id, t_i) = 2 \times \frac{2 \times dis(id, t_i)}{\lambda} \times 2\pi + \Theta + 2k\pi \quad (2)$$

其中: k 是 $\{0, \pm 1, \pm 2, \dots\}$ 范围内的常数整数。

2 M2R 系统原理

在这一部分, 将首先描述 M2R 的简单情况, 在二维空间中的定位。之后将解释如何扩展 M2R, 使之能够在一般应用场景下实现 3D 定位。

2.1 二维平面定位方法

对于 $X-Y$ 平面上的目标标签, 仍然假设阅读器已经收到了 n 个反射信息。因此, 在展开操作之后, 得到 n 个展开的相位点: $P'(id, t_1), P'(id, t_2), \dots, P'(id, t_n)$ 。所提出的 M2R 系统将 n 个没有发生相位纠缠的相位点平均划分为三段: $[P'(id, t_1), \dots, P'(id, t_w)], [P'(id, t_{(w+1)}), \dots, P'(id, t_{2w})], [P'(id, t_{(2w+1)}), \dots, P'(id, t_{3w})]$, 其中 $w = \left\lceil \frac{n}{3} \right\rceil$ 。然后, 从第一段取第 i -th 相位值 $P'(id, t_i)$, 从第二段取第 i -th 相位值 $P'(id, t_{(w+i)})$, 从第三段取第 i 相位值 $P'(id, t_{(2w+i)})$, 其中 $i \in [1, w]$ 。接下来, 将描述如何使用这 3 个选取的相位值来计算目标标记的位置。由于存在 w 个这样的相位三元组, M2R 系统可以计算 w 个候选标记位置^[15]。为了区分这些候选标签位置, 使用 (x_i, y_i) 来表示从相位三元组计算的候选标签位置: $P'(id, t_i), P'(id, t_{(w+i)})$ 和 P'

$(id, t_{(2w+i)})$ 。

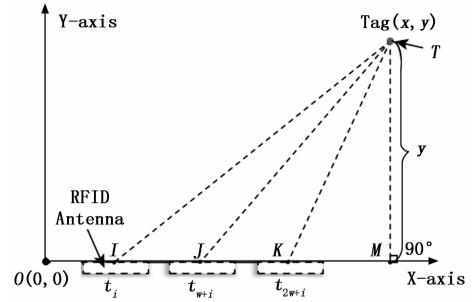


图 2 M2R 在二维空间中定位原理

如图 2 所示, 假设阅读器天线分别在 $t_i, t_{(w+1)}, t_{(2w+i)}$ 的时间点到达位置 I, J, K 。由公式 (2) 可计算相邻相点 $P'(id, t_i)$ 与 $P'(id, t_{(w+i)})$ 之间的差, 以及相邻相点 $P'(id, t_{(w+i)})$ 与 $P'(id, t_{(2w+i)})$ 之间的差, 计算如公式 (3) 所示:

$$\begin{cases} (P'(id, t_i) - P'(id, t_{(w+i)})) = \frac{4\pi \times (|\vec{IT}| - |\vec{JT}|)}{\lambda} \\ P'(id, t_{(w+i)}) - P'(id, t_{(2w+i)}) = \\ \frac{4\pi \times (|\vec{JT}| - |\vec{KT}|)}{\lambda} \end{cases} \quad (3)$$

根据图 2 所示的几何关系, 可得到公式 (4)。

$$\begin{cases} |\vec{IT}| = \sqrt{|\vec{IM}|^2 + |\vec{MT}|^2} \\ \vec{IM} = \vec{IK} + \vec{KM} \\ |\vec{JT}| = \sqrt{|\vec{JM}|^2 + |\vec{MT}|^2} \\ \vec{JM} = \vec{JK} + \vec{KM} \\ |\vec{KT}| = \sqrt{|\vec{KM}|^2 + |\vec{MT}|^2} \\ \vec{KM} = \vec{OM} + \vec{OK} \\ \vec{JK} = [v(t_{2w+i} - t_i), 0] \\ \vec{JK} = [v(t_{2w+i} - t_{w+i}), 0] \\ \vec{OK} = v(t_{2w+i}, 0) \\ \vec{MT} = (0, y) \\ \vec{OM} = (x, 0) \end{cases} \quad (4)$$

通过将公式 (4) 代入公式 (3), 得到了包含两个未知变量 x 和 y 的方程组, 然后求解方程组得到候选标记位置 (x_i, y_i) , 如公式 (5) 所示。

$$\begin{cases} x_i \leftarrow x = ut_{2w+i} + \frac{\left(\frac{\lambda\Delta\theta_2}{4\pi}\right)^2 - v^2 \Delta T_2^2 + \frac{\lambda\Delta\theta_2 S}{2\pi}}{2v\Delta T_2} \\ y_i \leftarrow y = \sqrt{S^2 - (x_i - ut_{2w+i})^2} \end{cases} \quad (5)$$

在这里, $\Delta\theta_2, \Delta T_2$ 以及 S 的值可以通过公式 (6) 计算得到:

由于随机误差的噪声，展开的相位值具有方差 $Var [P'(id, t_i)] = 0.01$ 。然后， $\Delta\theta_1$ 和 $\Delta\theta_2$ 的方差可以通过公式 (7) 和 (8) 计算得到：

$$S = \left\{ \begin{aligned} & \left\{ v^2 (\Delta T_1 + \Delta T_2)^2 + \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} + 1 \right) \right. \\ & \left. \left[\left(\frac{\lambda \Delta \theta_2}{4\pi} \right)^2 - v^2 \Delta T_2^2 \right] - \left[\frac{\lambda (\Delta \theta_1 + \Delta \theta_2)}{4\pi} \right]^2 \right\} \\ & \left(\frac{\lambda \Delta \theta_1}{2\pi} - \frac{\lambda \Delta \theta_2 \Delta T_1}{2\pi \Delta T_2} \right) \end{aligned} \right. \quad (6)$$

$$\begin{cases} \Delta\theta_1 = P'(id, t_i) - P'(id, t_{w+i}) \\ \Delta\theta_2 = P'(id, t_{w+i}) - P'(id, t_{2w+i}) \\ \Delta T_1 = t_{w+i} - t_i \\ \Delta T_2 = t_{2w+i} - t_{w+i} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} Var(\Delta\theta_1) &= Var[P'(id, t_i)] + \\ Var[P'(id, t_{w+i})] &= 0.02 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} Var(\Delta\theta_2) &= Var[P'(id, t_{w+i})] + \\ Var[P'(id, t_{2w+i})] &= 0.02 \end{aligned} \quad (8)$$

在 $\Delta\theta_1$ 和 $\Delta\theta_2$ 中固有的概率偏差也导致从公式 (5) 导出的候选标记位置 (x_i, y_i) 也不准确。为了量化定位偏差，在此计算了 x_i 和 y_i 的方差。可以从公式 (5) 观察到， x_i 和 y_i 都是 $\Delta\theta_1$ 和 $\Delta\theta_2$ 的函数。因此，把 x_i 分别作为 $\varphi_x(\Delta\theta_1, \Delta\theta_2)$ 和 y_i 作为 $\varphi_y(\Delta\theta_1, \Delta\theta_2)$ 。分别给出了 x_i 和 y_i 的泰勒的级数展开式 (h_1, h_2) 。这里， $h_1 = E(\Delta\theta_1)$ 和 $h_2 = E(\Delta\theta_2)$ 。具体如公式 (9) 和 (10)：

$$x_i = \varphi_x(h_1, h_2) + \frac{\partial \varphi_x}{\partial \Delta\theta_1} (\Delta\theta_1 - h_1) + \frac{\partial \varphi_x}{\partial \Delta\theta_2} (\Delta\theta_2 - h_2) \quad (9)$$

$$y_i = \varphi_y(h_1, h_2) + \frac{\partial \varphi_y}{\partial \Delta\theta_1} (\Delta\theta_1 - h_1) + \frac{\partial \varphi_y}{\partial \Delta\theta_2} (\Delta\theta_2 - h_2) \quad (10)$$

分别取上述两个方程两边的期望值，如公式 (11) 和 (12) 所示。

$$E(x_i) = \varphi_x(h_1, h_2) \quad (11)$$

$$E(y_i) = \varphi_y(h_1, h_2) \quad (12)$$

结合公式 (11) 和 (12)，在这里可以计算 x_i 和 y_i 的方差。具体如公式 (13) 和 (14) 所示：

$$\begin{aligned} Var(x_i) &= E[x_i - E(x_i)]^2 = \left(\frac{\partial \varphi_x}{\partial \Delta\theta_1} \right)^2 Var(\Delta\theta_1) + \\ & \left(\frac{\partial \varphi_x}{\partial \Delta\theta_2} \right)^2 Var(\Delta\theta_2) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} Var(y_i) &= E[y_i - E(y_i)]^2 = \left(\frac{\partial \varphi_y}{\partial \Delta\theta_1} \right)^2 Var(\Delta\theta_1) + \\ & \left(\frac{\partial \varphi_y}{\partial \Delta\theta_2} \right)^2 Var(\Delta\theta_2) \end{aligned} \quad (14)$$

根据公式 (13) 和 (14) 的要求，需要分别计算 $\frac{\partial \varphi_x}{\partial \Delta\theta_1}$ ，

$\frac{\partial \varphi_x}{\partial \Delta\theta_2}$ ， $\frac{\partial \varphi_y}{\partial \Delta\theta_1}$ ， $\frac{\partial \varphi_y}{\partial \Delta\theta_2}$ 的结果。由于表达式的复杂性，在这里用一些符号来表示方程中重复出现的项。具体地说， $A = v^2 (\Delta T_1 + \Delta T_2)^2$ ， $B = \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} + 1$ ， $C = v \Delta T_2$ ， $D = \frac{\lambda \Delta \theta_1}{4\pi}$ ， $T =$

$\frac{\lambda \Delta \theta_2}{4\pi}$ ， $F = \frac{\lambda (\Delta \theta_1 - \Delta \theta_2)}{4\pi}$ 。因此， $\frac{\partial \varphi_x}{\partial \Delta\theta_1}$ 和 $\frac{\partial \varphi_y}{\partial \Delta\theta_2}$ 的表达式如公式 (15) 所示。

$$\begin{cases} -2TF(\Delta\theta_1 - (\Delta\theta_1 - (B-1)\Delta\theta_2)) - \\ \frac{\partial \varphi_x}{\partial \Delta\theta_1} = \frac{\Delta\theta_2 [A + B(T^2 - C^2) - F]}{2C[\Delta\theta_1 - (B-1)\Delta\theta_2]^2} \\ \frac{\partial \varphi_y}{\partial \Delta\theta_2} = \frac{\lambda^2 \Delta\theta_2}{C(4\pi)^2} + \frac{G - H}{2C[\Delta\theta_1 - (B-1)\Delta\theta_2]^2} \end{cases} \quad (15)$$

其中：G 和 H 的表达式如公式 (16) 所示。

$$\begin{cases} G = [A + B(T^2 - C^2) - F^2 + \Delta\theta_2 \left(\frac{2BT^2}{\Delta\theta_2} - \frac{F\lambda}{2\pi} \right)] \\ [\Delta\theta_1 - (B-1)\Delta\theta_2] \\ H = \Delta\theta_2 [A + B(T^2 - C^2) - F^2] (1 - B) \end{cases} \quad (16)$$

进一步的， $\frac{\partial \varphi_y}{\partial \Delta\theta_1}$ 和 $\frac{\partial \varphi_x}{\partial \Delta\theta_2}$ 的表达式可用公式 (17) 计算：

$$\begin{cases} \frac{\varphi_x}{\theta_1} = \frac{2S \frac{\partial S}{\partial \Delta\theta_1} - 2(x_i - \varpi_{2w+i}) \frac{\partial \varphi_x}{\partial \Delta\theta_1}}{2 \sqrt{S^2 - (x_i - \varpi_{2w+i})^2}} \\ \frac{\varphi_y}{\theta_2} = \frac{2S \frac{\partial S}{\partial \Delta\theta_2} - 2(x_i - \varpi_{2w+i}) \frac{\partial \varphi_x}{\partial \Delta\theta_2}}{2 \sqrt{S^2 - (x_i - \varpi_{2w+i})^2}} \end{cases} \quad (17)$$

在这里， $\frac{\partial S}{\partial \Delta\theta_1}$ 和 $\frac{\partial S}{\partial \Delta\theta_2}$ 可通过公式 (18) 进行计算得到：

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial \Delta\theta_1} = \frac{2F\lambda [D - (B-1)T] - \lambda \{ [A + B(T^2 - C^2) - F^2] \}}{8\pi [A + B(D - (B-1)T)]^2} \\ \frac{\partial S}{\partial \Delta\theta_2} = \frac{2\lambda (BT - F) [D - (B-1)T] - \lambda [A + B(T^2 - C^2) - F^2] (1 - B)}{8\pi [A + B(D - (B-1)T)]^2} \end{cases} \quad (18)$$

到目前为止，已经计算了目标标签的候选位置，即公式 (5) 中的 (x_i, y_i) ，以及它们在等式 (13) 和 (14) 中的方差。提出的 M2R 系统可以计算 w 个候选标签位置： (x_1, y_1) ， (x_2, y_2) ， \dots ， (x_w, y_w) 。一种简单的方法是直接使用它们的平均值作为最终的定位结果。它很简单，但远不是最佳的，因为候选标记位置有不同的方差。直观地说，如果所有 3 个的相位点都位于展开相位剖面的最左侧部分（几乎在一条直线上），则计算出的候选标记位置可能不是非常精确。因此，没有直接使用候选标记位置的平均值，而是使用它们的加权平均值作为最终的定位结果^[16]。方差较小的候选标记位置应分配较大的权重，反之亦然。

因此，使用 $\frac{1}{Var(x_i)}$ 作为 x_i 的权重，使用 $\frac{1}{Var(y_i)}$ 作为 y_i 的权重。然后，通过 $\hat{x} = \sum_{i=1}^w \frac{x_i}{Var(x_i) N_x}$ 和 $\hat{y} = \sum_{i=1}^w \frac{y_i}{Var(y_i) N_y}$ 来计算标签的最终标记位置，其中 $N_x = \sum_{i=1}^w \frac{1}{Var(x_i)}$ ， $N_y = \sum_{i=1}^w \frac{1}{Var(y_i)}$ 。在图 3 (a) (b) 中，分别绘制由直接平均结果和加权平均结果计算的值 \hat{x} 和 \hat{y} 。

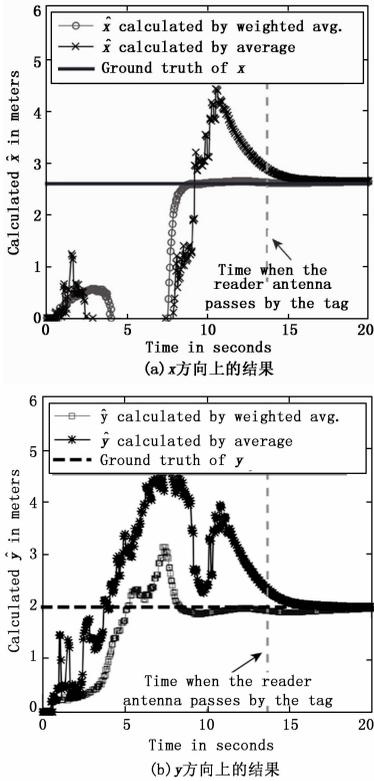


图 3 加权平均结果与直接平均结果的比较

从实验结果中得出两个主要的结论。首先，加权平均法比简单平均法更快地收敛到实际情况。其次， \hat{x} 和 \hat{y} 的值在第 7 秒已经非常接近地面真实值，这比阅读器的天线通过目标标签的时间早 6 秒。由于机器人的速度设置为 30 cm/s，这意味着 MRL 可以在阅读器天线通过目标标签前 1.8 米左右获得相对准确的定位结果。也就是说，M2R 系统能够定位到机器人无法通过的角落中的标记物体。

2.2 扩展到 3D 空间定位

通过同时使用两个天线 R_1 和 R_2 ，所提出的 M2R 系统可以很容易地扩展到实现 3D 定位。如图 4 所示，假设两个天线之间的距离为 h 米。由于下面的天线从原点开始，所以上面的天线将从点开始。 R_1 和 R_2 的轨迹彼此平行，并且距离为 h 。如上所述，我们可以利用每个标签读取中的天线端口信息来区分当前标签读取来自哪个天线。因此，可以得到分别对应于这两个天线的目标标签的两个相位剖面。

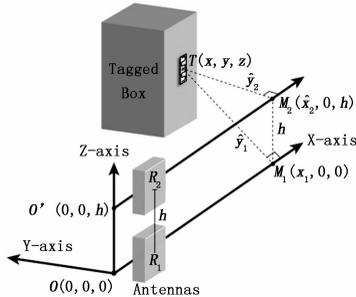


图 4 M2R 的三维空间定位原理

如图 4 所示，在 3D 空间中有两个平面： TOM_1 和 $TO'M_2$ 。在平面 TOM_1 上，将上述 2D 定位方法应用于与天线 R_1 相对应的相位剖面，并且可以计算标签位置 (\hat{x}, \hat{y}) 。从标记位置 $T(x, y, z)$ 画一条直线，垂直于 R_1 的轨迹，底脚为 M_1 。在 TOM_1 的平面上，很容易知道 $|\vec{OM}_1| = \hat{x}_1$ 和 $|\vec{TM}_1| = \hat{y}_1$ 。同样地，在 R_2 的相位剖面上应用二维定位方法，MRL 还可以计算出一个标签位置 (\hat{x}_2, \hat{y}_2) ，满足 $|\vec{O'M}_2| = \hat{x}_2$ 和 $|\vec{TM}_2| = \hat{y}_2$ 。很容易知道 M_1 和 M_2 的坐标分别是 $(\hat{x}_1, 0, 0)$ 和 $(\hat{x}_2, 0, h)$ 。在理想情况下，应该有 $x = \hat{x}_1 = \hat{x}_2$ 。由于定位结果的偏差， \hat{x}_1 可能不完全等于 \hat{x}_2 。然后，计算坐标值 $x = \frac{\hat{x}_1 + \hat{x}_2}{2}$ 。接下来，将研究如何计算目标标记的坐标值 y 和 z 。

三角形 ΔTM_1M_2 中的 3 种几何关系如图 5 所示，分别对应于 $z \in (0, h)$, $z \leq 0$, $z > h$ 。不管实际应用的是哪种几何关系，总是有公式 (19)。

$$\begin{cases} |\vec{TM}_1| = \sqrt{y^2 + z^2} = \hat{y}_1 \\ |\vec{TM}_2| = \sqrt{y^2 + (z-h)^2} = \hat{y}_2 \end{cases} \quad (19)$$

通过求解上述方程组，可以计算目标标签在三维空间中的坐标，如公式 (20) 所示：

$$\begin{cases} \hat{x} = \frac{\hat{x}_1 + \hat{x}_2}{2} \\ \hat{y} = \sqrt{\hat{y}_1^2 - \left[\frac{\hat{y}_1^2 - \hat{y}_2^2 + h^2}{2h} \right]^2} \\ \hat{z} = \frac{\hat{y}_1^2 - \hat{y}_2^2 + h^2}{2h} \end{cases} \quad (20)$$

到目前为止，M2R 系统已经被扩展，成功地启用了 3D 定位功能

3 实验与评估

3.1 实验环境设置

该系统基于一个使用 Impinj R420 实现的移动机器人原型，如图 6 所示，带有两个圆极化天线，发射载波频率固定在 920.625 MHz。将读写器的发射功率调整为 30 dBm 的有效各向同性辐射功率。机器人运行速度为 30 cm/s，该程序运行在一台联想笔记本电脑上，搭载英特尔 I5 2.6 GHz 处理器，16 GB 内存。利用 Python 开发了控制阅读器和移动机器人平台轨迹的程序。整个实验环境是在一个 100 平方米的空旷室内进行，标签贴附于设备的外包装纸箱上。

3.2 2D 空间定位评估

在这组实验中，研究了 M2R 系统在二维平面上的定位精度。如图 6 (b) 所示，在 6 个纸箱上贴上 6 个标签。贴有标签的纸箱放置在距离移动机器人轨迹 0.8 米以上的地方。

在图 7 中，实际标签位置用“+”标记。阅读器的天线和这 6 个标签在同一平面上。M2R 系统以 0.3 m/s 的速度通过这些带标签的纸箱，然后报告它们的位置。同一实验

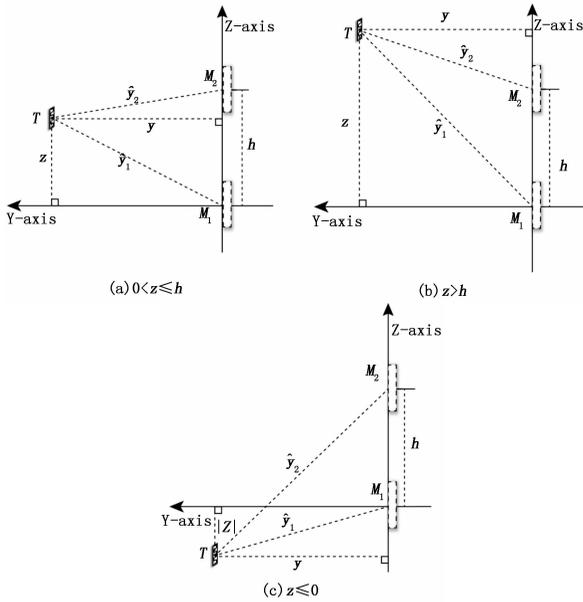
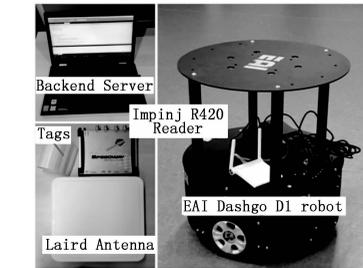
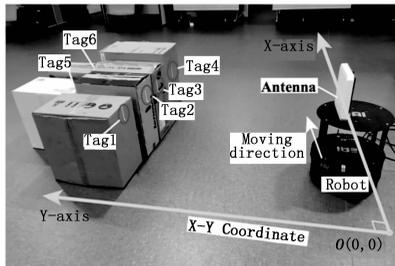


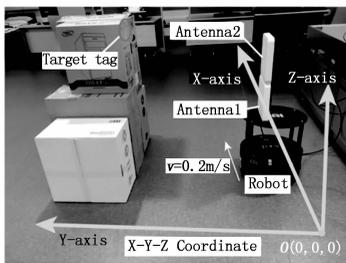
图5 变量之间的几何关系



(a) 设备图示



(b) 2D环境图示



(c) 3D环境图示

图6 M2R系统示意图

为了清楚地评估 M2R 的定位精度，还绘制了图 8 中 \hat{x} 和 \hat{y} 的定位误差 CDF 曲线。

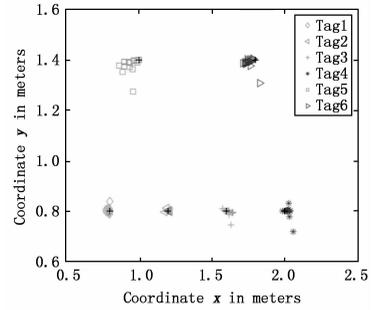
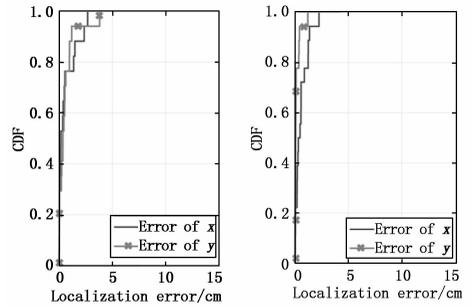
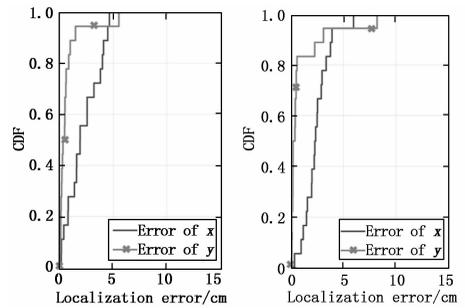


图7 二维平面上多个 RFID 标签的定位结果



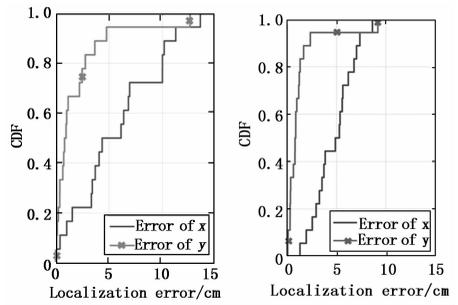
(a) 标签 1

(b) 标签 2



(c) 标签 3

(d) 标签 4



(e) 标签 5

(f) 标签 6

图8 M2R 对 6 个标签的 CDF 结果

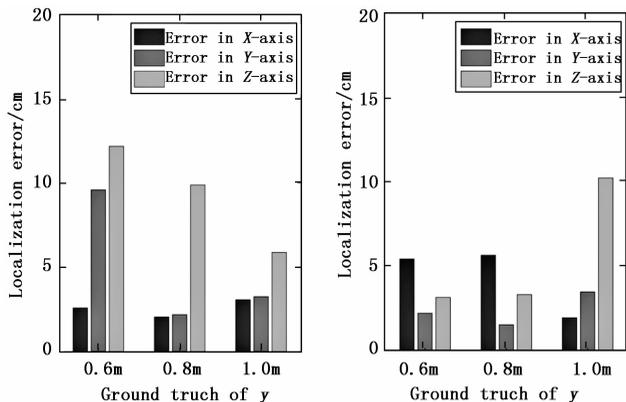
重复多次，定位结果也如图 7 所示。可以观察到每个标签的计算位置都非常接近实际情况。对于具有位置 (x, y) 的标记，如果计算出的位置是 (\hat{x}, \hat{y}) ，将 $|x - \hat{x}|$ 称为 \hat{x} 中的定位误差，类似地，将 $|y - \hat{y}|$ 称为 \hat{y} 中的定位误差。

从图 8 可以看出，沿 X 轴的定位误差通常小于 Y 轴的定位误差。图 8 (a) ~ (d) 的结果表明，M2R 系统的定位误差小于 5 cm，概率大于 90%。然而，标签 5 和标签 6 的定位误差比其他标签的定位误差要大一些，因为这两个

标签的信号受到阅读器天线的视线路径中的纸箱的影响。

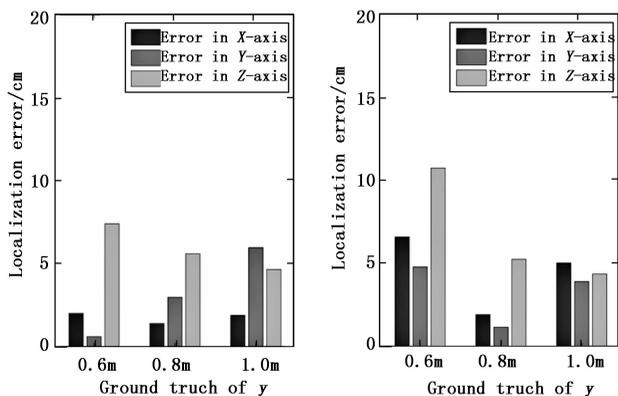
3.3 3D 空间定位评估

M2R 在三维空间中的实验部如图 6 (c) 所示。天线 R1 的运动轨迹被视为 X 轴的正方向。在这样的坐标系中, 将目标标记放置在不同的位置。 x 的地面真实度在 1 m 到 1.5 m 之间变化; y 的地面真实度在 0.6 m 到 0.8 m 和 1 m 之间; z 的地面真实度在 0.35 m 到 0.7 m 之间。图 9 所示的实验结果显示了所提出的 M2R 系统的三维定位精度: 沿 X 轴和 Y 轴的大多数定位误差小于 7 cm, 沿 Z 轴的大多数定位误差小于 12 cm。这样的定位精度可以满足大多数应用场景的要求。



(a) 标签在 (1 m, y, 0.35 m) 位置

(b) 标签在 (1.5 m, y, 0.35 m) 位置



(c) 标签在 (1 m, y, 0.7 m) 位置

(d) 标签在 (1.5 m, y, 0.7 m) 位置

图 9 M2R 在三维空间中不同位置的定位结果

4 结束语

为了更好地实现智能电网中的无人化工厂管理, 本文利用商用机器人和 RFID 设备提出了移动 RF 机器人定位 (M2R) 系统, 利用 RFID 相位剖面中的时空信息对标签进行精确定位。与现有的 RFID 定位系统相比, M2R 有四大优势。首先, M2R 系统只采用了商用设备, 而不是任何专

用定制设备。因此, 它很容易被重新实现以得到广泛的应用。第二, M2R 能够解决三维定位问题, 适合于更多的应用场景。第三, M2R 可以在经过标记物之前对其进行定位, 从而不受盲区限制。第四, 单套 M2R 系统可以为大范围的监控区域提供移动定位服务。因此, 该方法可以实现大面积仓储管理。

参考文献:

- [1] 刘引, 侯守峰. 探析智能电网建设中存在的问题及对策 [J]. 数字通信世界, 2019 (11): 248
- [2] 邱兰馨, 黄樟钦, 梁笑轩. RFID 标签位置感知技术综述 [J]. 计算机应用研究, 2017, 34 (12): 3521-3526
- [3] 温凯峰. 一种自动跟踪的智慧物流信息处理系统的设计 [J]. 计算技术与自动化, 2016, 35 (2): 136-140.
- [4] 余世欣, 李勇. 基于 RFID 的仓储管理系统 [J]. 信息技术, 2016 (5): 81-83.
- [5] 梁笑轩, 黄樟钦, 邱兰馨. 一种基于二维相控阵天线的 RFID 定位方法 [J]. 电子学报, 2018, 46 (4): 911-917.
- [6] 梁永湖, 章金标. 基于 RFID 仓库管理系统的设计与实现 [J]. 物联网技术, 2018, 8 (6): 96-98.
- [7] 苏丰, 陆志浩, 毛颖科, 等. 基于 RFID 技术的变电站运行巡检管理系统 [J]. 电子设计工程, 2020, 28 (3): 129-132+137.
- [8] 汪海燕, 洪榛, 周丽丹, 等. 监狱犯人室内定位算法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (6): 174-177.
- [9] Qiu L, Huang Z, Wirstrom N, et al. 3DinSAR: Object 3D localization for indoor RFID applications [A]. IEEE International Conference on RFID [C]. IEEE, 2016: 1-8.
- [10] Yang L, Chen Y, Li X, et al. Tagoram: Real-time tracking of mobile RFID tags to high precision using COTS devices [A]. Proc. of ACM MobiCom [C]. 2014: 237-248.
- [11] Duan C, Yang L, Jia H, et al. Robust Spinning Sensing with Dual-RFID-Tags in Noisy Settings [A]. IEEE INFOCOM 2018 - IEEE Conference on Computer Communications [C]. IEEE, 2018: 855-863
- [12] 段伟, 吕孝雷. 一种新的桥梁区域时序 InSAR 相位解缠方法 [J]. 中国科学院大学学报, 2019, 36 (2): 251-258.
- [13] 蒋留兵, 肖志涛, 车俐, 等. 基于质量引导的 InSAR 快速相位解缠方法 [J]. 计算机工程与应用, 2018, 54 (3): 222-226.
- [14] 徐华平, 高帅, 尤亚楠. 一种基于增采样的干涉 SAR 相位解缠方法 [J]. 电子与信息学报, 2017, 39 (12): 2811-2818.
- [15] 邱兰馨, 黄樟钦, 李达. 一种基于多相位差的 RFID 标签三维定位方法 [J]. 计算机学报, 2019, 42 (11): 2512-2525.
- [16] Qiu L, Liang X, Huang Z. PATL: A RFID Tag Localization based on Phased Array Antenna [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 44183.