

# 超声波网络导航中移动机器人的位置计算

□ 俞竹青 那须康雄

江苏石油化工学院机械工程系

**【摘要】** 在利用超声波网络进行室内移动机器人的导航中采用三点测位方式。在理论上,有三个圆相交于一点即移动机器人的位置。但实际上由于测量数据误差的存在,这三个圆并非相交于一点而是三点,这三个交点构成一个小圆弧三角形区域,使移动机器人的位置确定复杂化。本文提出一种位置计算方法,取它的内切圆心位置代表移动机器人的位置。理论分析与应用于实验数据的结果表明,所取的代表点与移动机器人的实际位置充分接近,满足一般移动机器人的精度要求,证实了本文提出的位置计算方法的有效性和实用性。

**【关键词】** 移动机器人;超声波网络;位置计算

**【Abstract】** This paper proposes a position calculation method for mobile robot navigated with ultrasonic net. Three points measure method is employed to calculate the position of the mobile in ultrasonic net navigation, and there are three circles to intersect at one point of mobile position theoretically. In practice they intersect at not one point but three points for errors of measured datas. The three intersected points form a triangle, and the center of its inner tangent circle is selected as actual mobile position. Theoretical analysis and application results to some experiment datas show that the selected point is enough near the actual mobile position. So it is proved that the proposed calculation method is available and useful.

**【Key words】** mobile robot, ullasonic net, position caleculatron.

## 1. 前言

为了替代人类工作,各种各样的机器人在工业上等到了广泛的应用,把人类从繁重和危险的作业中解放了出来,提高了产品质量和生产率。台座固定式作业机器人是历来的主流,但是近年来,移动作业机器人由于它有较大的作业范围和柔性而越来越受到人们的关注。

移动机器人的位置检测是其实现自主移动的基本技术。常用的位置检测方法有视觉图像分析法,诱导线法,路程累计法,超声波灯台法等<sup>[1,2,3]</sup>,但它们都存在各自的局限之处,最突出的问题是检测范围和检测精度的矛盾。作为解决这个矛盾的一个途径,笔者提出了超声波网络导航系统<sup>[4,5,6]</sup>,该导航系统的检测范围在理论上可以无限扩张,但检测精度却不变。本文就该导航系统的位置检测计算方法做进一步理论分析研究。

## 2. 超声波网络导航系统

### 2.1 超声波网络导航系统的组成

本文的超声波网络导航系统适用于室内(或车间内)平面二维移动作业机器人的导航。它由超声波发射系统、超声波接收网络(以下简称接收网络)、无线通信系统三个部分组成(图

1)。安装于移动机器人上的两个广角超声波发射器交替向正上方空中发射超声波构成发射系统;在移动机器人的移动范围的上方一定高度的水平面内按等间隔距离纵横配置超声波接收器(以下简称接收器)形成接收网络;发射系统和接收系统经无线电通讯与控制计算机进行数据和指令的传输。

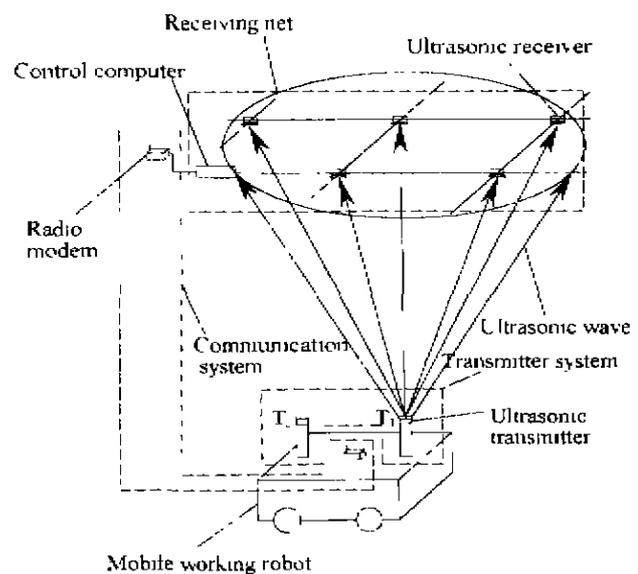


Fig1. Position measurement system of mobile robot using sonar net

2.2 移动机器人在超声波网络导航系统中位置、姿态的检测原理

移动机器人上的两个超声波发射器位置设为  $T_1(x_1, y_1, 0)$ ,  $T_2(x_2, y_2, 0)$ 。适当调整接收网络中接收器配置的距离间隔,就能保证接收网络中至少有三个接收器接收到从超声波发射器  $T_i(i=1, 2)$  发出的超声波,选出其中的三个接收器分别表示为  $R_{i1}, R_{i2}, R_{i3}$ , 它们的坐标值分别为  $R_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, H)$ ,  $R_{i2}(x_{i2}, y_{i2}, H)$ ,  $R_{i3}(x_{i3}, y_{i3}, H)$ (图 2)。接收网络中各个接收器是预先

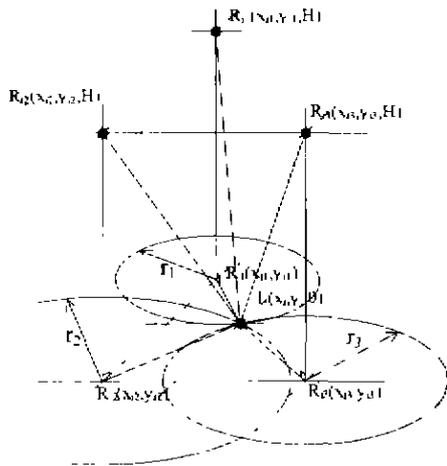


Fig. 2 Position estimation of transmitter

配置的,它们的坐标值是已知的。超声波发射器  $T_i$  分别到接收网络中三个接收器  $R_{i1}, R_{i2}, R_{i3}$  的距离  $\rho_{i1}, \rho_{i2}, \rho_{i3} (i=1, 2)$  由超声波的传播时间测定出来。因此,根据三点测位原理,超声波发射器  $T_i(i=1, 2)$  的坐标值可由联立方程组(1)求得。

$$\left. \begin{aligned} (x_{i1} - x_i)^2 + (y_{i1} - y_i)^2 + H^2 &= \rho_{i1}^2 \\ (x_{i2} - x_i)^2 + (y_{i2} - y_i)^2 + H^2 &= \rho_{i2}^2 \\ (x_{i3} - x_i)^2 + (y_{i3} - y_i)^2 + H^2 &= \rho_{i3}^2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中,  $H$  是接收网络相对与超声波发射器的垂直高度。

个超声波发射器  $T_1(x_1, y_1, 0)$ ,  $T_2(x_2, y_2, 0)$  的位置求得后,移动机器人的姿态  $\theta$  可由式(2)求得。

$$\theta = \arctan\left(\frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2}\right) \quad (2)$$

3. 移动机器人位置的计算

3.1 移动机器人位置的判定

在图 2 中,  $R'_{i1}(x_{i1}, y_{i1}), R'_{i2}(x_{i2}, y_{i2}), R'_{i3}(x_{i3}, y_{i3})$  分别是  $R_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, H), R_{i2}(x_{i2}, y_{i2}, H), R_{i3}(x_{i3}, y_{i3}, H)$  在水平面内的垂直投影点,  $r_1, r_2, r_3$  是超声波发射器  $T_i$  分别

到  $R'_{i1}, R'_{i2}, R'_{i3}$  的距离半径。

在理想情况下,联立方程组(1)的解是唯一的,即在水平面上三个圆相交于同一点  $T_i(x_i, y_i)$ (图 3)。但实际上由于误差的存在,水平面上的三个圆并不相交于  $T_i(x_i, y_i)$  一点,而是围绕在  $T_i(x_i, y_i)$  周围相交于三点,形成一个圆弧三角形(图 4)。选取哪一个点来代表

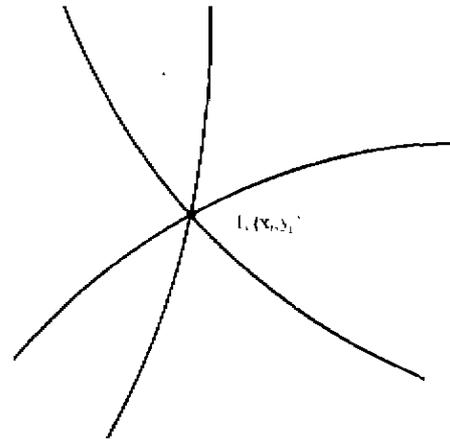


Fig. 3 position estimation of transmitter from three receivers with no errors

$T_i(x_i, y_i)$  是首要解决的问题。本文选取圆弧三角形的内切圆心  $T_i(x_i, y_i)$  代表移动机器人的位置  $T_i(x_i, y_i)$ 。

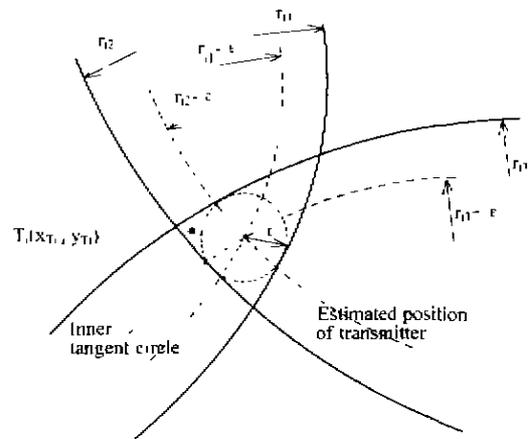


Fig. 4 position estimation of transmitter from three receivers with errors

3.2 移动机器人位置的求解计算

如图 4 中所示,设圆弧三角形内切圆的半径为  $\epsilon$ , 以  $\epsilon$  修正三个半径  $r_1, r_2, r_3$  为  $r_1 - \epsilon, r_2 - \epsilon, r_3 - \epsilon$ , 修正后的三个圆相交于点  $T_i(x_i, y_i)$ 。联立方程组(1)改写如下:

$$\left. \begin{aligned} (x_{i1} - \hat{x}_i)^2 + (y_{i1} - \hat{y}_i)^2 &= (r_1 - \epsilon)^2 \\ (x_{i2} - \hat{x}_i)^2 + (y_{i2} - \hat{y}_i)^2 &= (r_2 - \epsilon)^2 \\ (x_{i3} - \hat{x}_i)^2 + (y_{i3} - \hat{y}_i)^2 &= (r_3 - \epsilon)^2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

根据联立方程组(3)便可求得移动机器人的位置  $T_i(x_i, y_i)$ 。在求解该方程组时,  $\epsilon$  有两个值, 采用其中正值且绝对值较小的作为  $\epsilon$  值, 从而求得唯一的  $T_i(x_i, y_i)$ 。

圆弧三角形的类型不同, 半径的修正方向也不同(图5)。图5(a)的情况下三个半径分别修正为  $r_1 + \epsilon$ ,  $r_2 + \epsilon$ ,  $r_3 + \epsilon$ ; 图5(b)的情况下三个半径分别修正为  $r_1 - \epsilon$ ,  $r_2 - \epsilon$ ,  $r_3 + \epsilon$ 。因此, 在修正三个半径之前, 要先判定修正方向。

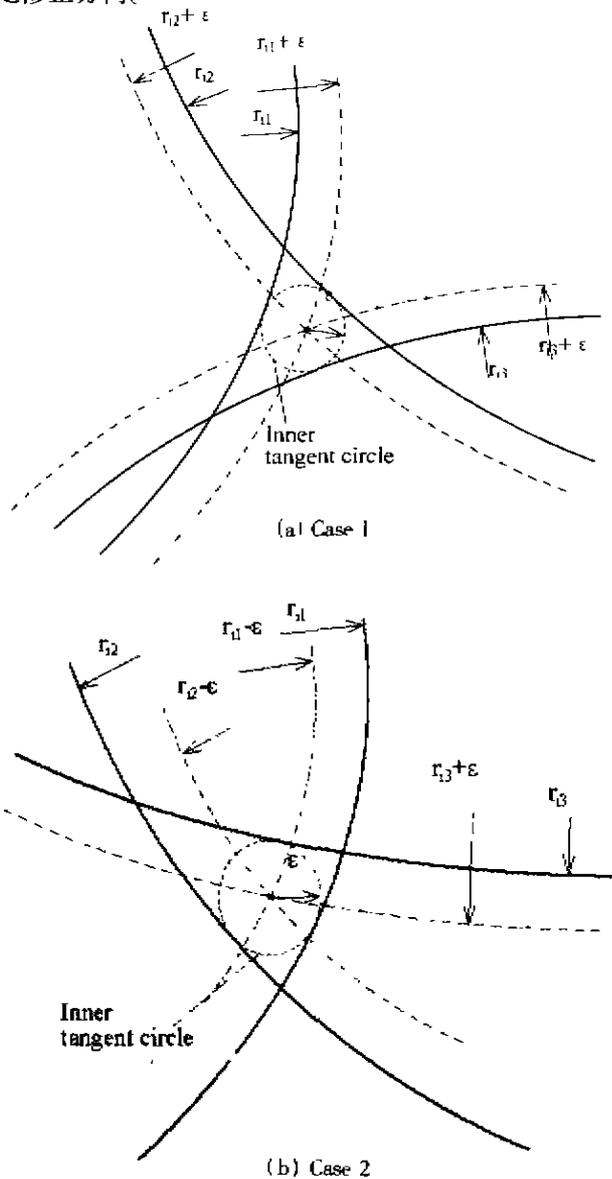


Fig. 5 Modifying directions of radiates by  $\epsilon$  in different cases

图6所示, 将三个圆分别表示为如下函数:

$$f_1(x, y) = (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 - r_1^2 = 0 \quad (4)$$

$$f_2(x, y) = (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 - r_2^2 = 0 \quad (5)$$

$$f_3(x, y) = (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 - r_3^2 = 0 \quad (6)$$

三个圆中每两个圆相交都有两个交点,  $f_2$  和  $f_3$  的两个交点分别表示为  $T_{21}(x_{T21}, y_{T21})$  和  $T'_{21}(x'_{T21}, y'_{T21})$ 。把该两点的坐标值分别代入函数  $f_1(x, y)$ , 得到两个函数值  $f_1(x_{T21}, y_{T21})$  和  $f_1(x'_{T21}, y'_{T21})$ , 并规定:

$$|f_1(x_{T21}, y_{T21})| \leq |f_1(x'_{T21}, y'_{T21})|$$

舍掉  $T'_{21}(x'_{T21}, y'_{T21})$ , 保留  $T_{21}(x_{T21}, y_{T21})$ 。同理, 得到  $f_1$  和  $f_3$  的交点  $T_{13}(x_{T13}, y_{T13})$ ,  $f_2$  和  $f_3$  的交点  $T_{23}(x_{T23}, y_{T23})$ 。  $T_{13}(x_{T13}, y_{T13})$ ,  $T_{23}(x_{T23}, y_{T23})$ ,  $T_{12}(x_{T12}, y_{T12})$  才是构成本文讨论的圆弧三角形的三个顶点。

如果  $f_j(x_{Tj}, y_{Tj}) > 0$  ( $j = 1, 2, 3$ ), 半径正向修正为  $r_j + \epsilon$ ; 反之, 则负向修正为  $r_j - \epsilon$ 。

令  $i$  代表安装在移动机器人上的两个超声波发射器的序号,  $j$  代表构成圆弧三角形的三个顶点的序号, 则联立方程组(3)用一般化表示为:

$$(x_j - \hat{x}_i)^2 + (y_j - \hat{y}_i)^2 = \left( r_i + \frac{f_j(x_{Tj}, y_{Tj})}{|f_j(x_{Tj}, y_{Tj})|} \epsilon \right)^2 \quad (i = 1, 2; j = 1, 2, 3) \quad (7)$$

#### 4. 实测应用

为检验本文提出的位置计算法的正确性和使用性, 把它应用于一组实测数据。实验中的超声波发射器和接收器采用日本村田制作所生产的 MA40E7R/S, 测量范围 200 ~ 3000mm, 分辨率 9mm, 发射角 100°。构造

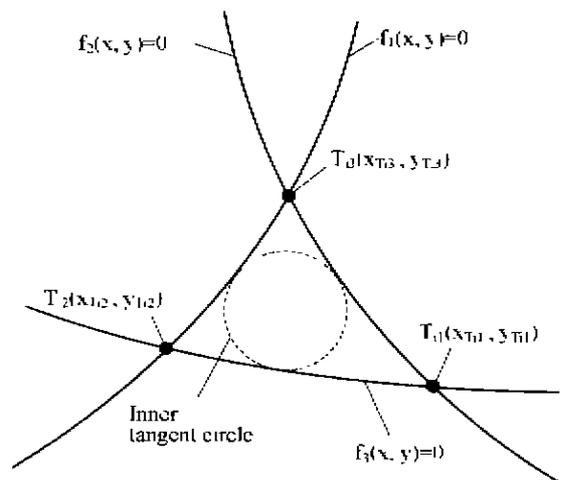


Fig. 6 Analysis of inner tangent circle of the three circles

的超声波接收网络与超声波发射器的垂直距离  $H = 1700\text{mm}$ , 超声波接收器的分布间隔  $d = 1170\text{mm}$ 。有三个超声波发射器  $T_i(x_i, y_i)$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 分别位于不同位置, 每个位置重复测量 3 次, 实测数据与计算结果列于表 1。

Tab. 1 Experiment datas and application results(mm)

Actual position of $T_i(x_i, y_i)$	Position of $R_i(x_{0i}, y_{0i})$	Measuring number $n$	Measured distance $\rho_1$	Measured distance $\rho_2$	Measured distance $\rho_3$	Estimated position of $T_i(x_i, y_i)$	Error radiate $\delta_i$
$T_1$ (110, 110)	$R_1(1170, 1170)$	1	2250	2020	2000	(103, 135)	2.6
	$R_2(1170, 0)$	2	2276	2001	2025	(121, 79)	33
	$R_3(0, 1170)$	3	2268	2018	2027	(106, 90)	20
$T_2$ (2140, 120)	$R_1(3510, 1170)$	1	2408	2235	2201	(2141, 122)	02
	$R_2(1170, 1170)$	2	2435	2232	2174	(2152, 98)	25
	$R_3(3510, 0)$	3	2427	2208	2196	(2127, 135)	20
$T_3$ (1810, 2170)	$R_1(3510, 1170)$	1	2592	2419	2268	(1810, 2145)	25
	$R_2(3510, 2340)$	2	2586	2427	2243	(1817, 2170)	07
	$R_3(1170, 3510)$	3	2613	2405	2241	(1819, 2203)	34

表中误差半径  $\delta_i$  是超声波发射器实际位置  $T_i(x_i, y_i)$  和推算  $T_i(x_i, y_i)$  位置  $T_i(x_i, y_i)$  ( $i=1, 2, 3$ ) 之间的距离, 从表中推算结果可见, 超声波发射器的推算位置 and 实际位置相差很小, 满足一般移动机器人的要求, 可以代表实际位置。

## 5. 结论

本文提出了室内移动机器人在超声波网络导航中三点测位方式下的改进位置计算方法, 并阐述了它的计算原理, 计算过程。应用于实测数据的处理后, 其精度及稳定性均较好, 满足一般移动机器人的位置精度要求, 证实了该方法的正确性和实用性。

### 参考文献

[1] 铃木升: パソナルナビゲーションにおける位置決め, 精密工学会志(特集: 自律移動体の位置決め技術), Vol. 65, No. 10

1999) 1394-1397

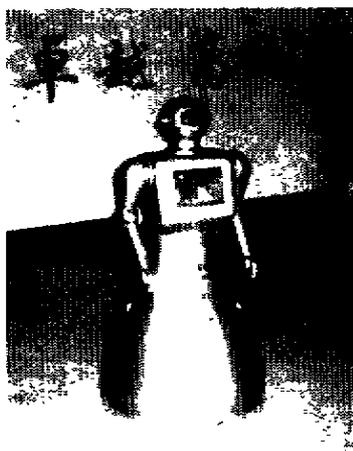
[2] 平野和夫: カーナビゲーションにおける位置決め技術, 精密工学会志(特集: 自律移動体の位置決め技術), Vol. 65, No. 10(1999) 1389-1393

[3] 关启明, 坂下英司: 屋内移動ロボット用の超音波灯台き用いた位置検出した位置検出システムの開発, 先端加工, Vol. 17, No. 1(1998)

[4] 俞竹青, 那须康雄, 中岛新一, 水戸部和久, “超音波センサネットを用いた範囲位置検出システムの開発”, 精密工学会志, Vol. 67, No. 5(2001) 764-769.

[5] Zhuqing YU, Yasuo NASU, Shin-ichi NAKAJIMA, Kazuhisa MITOBE, “Positioning System for Mobile Robot Using Ultrasonic Receiver Net”, Proceedings of the First International Conference on Mechatronics - ICOM' 01, (Kuala Lumpur, Malaysia), February 2001, Volume 1, pp213-226.

[6] 俞竹青, 超音波センサネットを用いた範囲位置検出システムの開発とモビルマニピュレータへの応用, 日本山形大学博士学位論文, 2001年3月



## 智能服务机器人简介

智能服务机器人是海尔哈工大机器人技术有限公司开发研制成功的我国第一台基于PC机的智能型服务机器人, 是“863计划”的资助项目。他具有无缆行走、自主路径规划、障碍物识别及回避、语言识别和语音合成、自由对话及讲解等功能。它可应用于商场导购; 旅游景点、博物馆导游; 宾馆、餐厅、银行和医院等行业的特殊服务(如配备多媒体触摸屏电脑, 可进行自动查询实现导游或宣传); 也可作为教学试验工具, 普及机器人技术。它是一种融合电机驱动技术、多传感器信息融合技术、语音合成技术、计算机多媒体技术等多项高新技术的智能服务机器人。

智能服务机器人“童童”是海尔哈工大机器人技术有限公司继成功推出前三代智能机器人的基础上, 新开发研制出的成本低、外形小巧可爱的新型智能服务机器人。他不仅保留了无缆行走、自主路径规划、障碍物的识别及回避等功能, 而且外形小巧, 动作更加灵活。在语言识别和语言合成、自由对话及讲解等功能方面又有所突破, 采用了新的语音合成技术, 使其具有语音识别率更高, 合成语言更准确等优点。■