

超声波绝对定位的全方位移动机械手导航研究

赵杰, 蒋林, 闫继宏, 朱延河

(哈尔滨工业大学机器人研究所, 150080, 哈尔滨)

摘要: 为提高全方位移动机械手(ODMM)导航的效率和精度,提出了基于超声波绝对定位的导航策略,策略包括绝对定位的奔向目标行为与避障行为。相对于传统的导航策略,该策略的优势在于可以时时精确定位,时时调整自己的航向与速度。同时,提出采用单冗余信息融合(FSRI)法来提高超声波的绝对定位精度,并将基于FSRI法的绝对定位应用到ODMM导航上。仿真与实验结果证明,基于超声波绝对定位的导航算法是正确的,可大大提高ODMM的导航效率和精度。

关键词: 超声波绝对定位;导航策略;奔向目标行为;避障行为

中图分类号: TP29 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)03-0337-05

Navigation of Omni-Directional Mobile Manipulator Based on Ultrasonic-Absolute-Positioning

ZHAO Jie, JIANG Lin, YAN Jihong, ZHU Yanhe

(Robotics Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: To improve the navigation efficiency and precision of the omni-directional mobile manipulator (ODMM), the ultrasonic-absolute-positioning strategy is proposed, where the move-to-goal behavior and avoid-obstacle behavior based on absolute positioning are involved. Compared with the conventional navigation strategies, the strategy is endowed with the superiorities, such as instant accurate locality, posture and speed adjusting. Then the fusing single redundant information (FSRI) method is adopted to improve the precision of the ultrasonic-absolute-positioning, and an ODMM navigation strategy based on FSRI method absolute positioning is presented. The experimental and simulation results confirm the validity of the navigation strategy.

Keywords: ultrasonic-absolute-positioning; navigation strategy; move-to-goal behavior; avoid-obstacle behavior

移动机器人导航主要解决的问题包括:机器人在空间的位置、方向和环境信息的精确检测,所获取信息的分析及环境模型的建立,机器人安全移动的运动路径规划^[1]。目前,移动机器人已有多种导航方式,根据环境信息的完整度、导航指示信号类型及导航地域等的不同,可分为地图导航^[2-3]、陆标导航^[4]、视觉导航^[5-6]、多传感信息融合导航和组合式导航^[7-8],基于绝对定位的导航在大范围内有全球定位系统(GPS)导航,在局部范围内采用超声波进行绝对定位导航的研究比较见文献^[9-10],但这些导航

方式都存在着定位精度有限的问题。本文提出的单冗余信息融合(FSRI)法能够大大提高超声波绝对定位的导航精度,在全方位移动机械手(ODMM)导航中可以大大提高移动机器人完成任务的效率。

1 基于FSRI法的绝对定位系统

1.1 单冗余信息融合定位法

FSRI法的整体思想就是利用冗余信息间的特有几何关系,以及冗余信息与误差间的隐含关系,进行误差评估、误差修正和提高精度。

FSRI法在平面定位时采用3个超声波接收装置,并且多出一个冗余测量值,利用这个冗余测量值来提高定位精度,在ODMM定位与导航中也采用FSRI法。

如图1所示,图中有3个位置固定的接收器,接收器的坐标为 $R_1(-a,0)$ 、 $R_2(0,0)$ 和 $R_3(a,0)$,将发射器固定在ODMM上, $T_u(x_i, y_i)$ 表示第 u 个发射器在第 i 次测量时的空间位置,其中 $u \in (1, \dots, 8)$,与3个接收器间有

$$\left. \begin{aligned} (a+x_i)^2 + y_i^2 &= (L_{1i} - q_i)^2 \\ x_i^2 + y_i^2 &= (L_{2i} - q_i)^2 \\ (a-x_i)^2 + y_i^2 &= (L_{3i} - q_i)^2 \\ (x_i^2 + y_i^2)^{1/2} &= L \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: a 为接收器间的距离; L_{ni} ($n=1,2,3$)为接收器间的测量距离; q_i 为第 i 次的测量误差。当波头滞后误差一致时, $q_i \in (0 \sim 5\lambda_i)$, λ_i 为第 i 次测量时的超声波波长。当误差不一致时, $q_i \notin (0 \sim 5\lambda_i)$,式(1)所得到的值不准确,此时将3个测量值(L_{1i} 、 L_{2i} 和 L_{3i})中最大的一项减 λ_i 后代入式(1),重新得到 q_i 。当 $q_i \in (0 \sim 5\lambda_i)$ 时停止,否则将3个测量值中最小的一项加 λ_i 后代入式(1),重新得到 q_i ,否则舍弃这组值并重新测试。

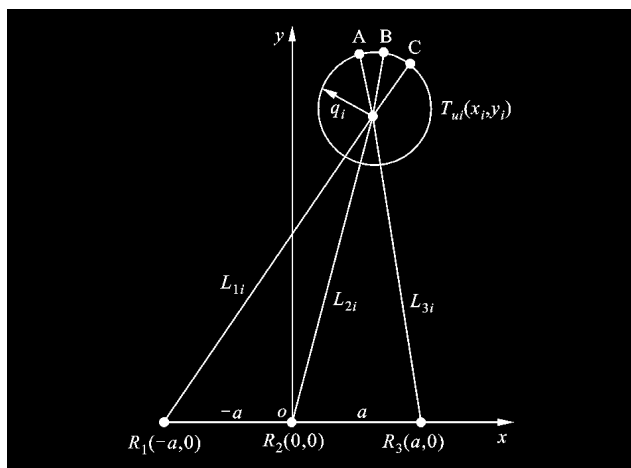


图1 单冗余信息融合定位图

1.2 FSRI法的绝对定位实验

如图2所示,系统中将一个超声波发射模块固定在ODMM上,发射模块有8个超声波发射器,每个发射器的波束角为 60° ,这样就覆盖了周围 360° 的范围。在定位时,每次仅让对着3个接收器的那个发射器发送超声波,将3个超声波接收器固定在桌面上,并且超声波发射器与接收器的空间高度相同。超声波发射器为T40-16,发射频率为40 kHz,每次发送5个波,间隔至少25 ms。3个超声波接收器为

R40-16,每路接收信号先通过两级放大,再通过半波整流,然后通过比较器进行比较,通过锁存器将信号锁存,最后将锁存的信号送到TMS320LF2407-DSP的捕获引脚进行识别捕获。3路信号分别对应3个捕获引脚,并用测温传感器来确定声速。3个超声波接收器共用一块处理芯片,将接收来的超声波信息按FSRI法进行处理后得到超声波发射器的空间绝对位置,而超声波发射模块、FSRI法处理模块以及PC机之间,通过无线通讯模块ZF01交换信息。



图2 FSRI法的定位系统

在无风的环境下, $t_i=24^\circ$ 时,初步取 $a=25$ cm,建立的定位系统中各项参数的取值为

$$\left. \begin{aligned} v_i &= 345.704 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \\ t_c &= 0.33 \\ \lambda_i &= 0.864 \text{ cm} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: v_i 表示第 i 次测量时的超声波声速,其表达式见文献[9]; t_c 为计数脉冲时间分辨率。各接收器的测量值与各参数表示为

$$\left. \begin{aligned} L_{1i} &= t_c t'_{c1i} v_i \\ L_{2i} &= t_c t'_{c2i} v_i \\ L_{3i} &= t_c t'_{c3i} v_i \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: t'_{oni} ($n=1,2,3$)为第 n 个接收器的第 i 次计数值。对实验系统进行标定后的表示方程为

$$\left. \begin{aligned} (25.6+x_i)^2 + y_i^2 &= (t_c t'_{c1i} v_i - q_i)^2 \\ x_i^2 + y_i^2 &= (t_c t'_{c2i} v_i - q_i)^2 \\ (x_i - 23.75)^2 + y_i^2 &= (t_c t'_{c3i} v_i - q_i)^2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

通过求取 q_i 和 x_i 、 y_i ,来定位实验测量的超声波发射器发射中心的位置,实验结果见表1。

由表1可见,FSRI法的测量精度很高,同时在同一点多次测量值的一致性也很好。可见,FSRI法是正确有效的,它提高了超声波绝对定位的精度。

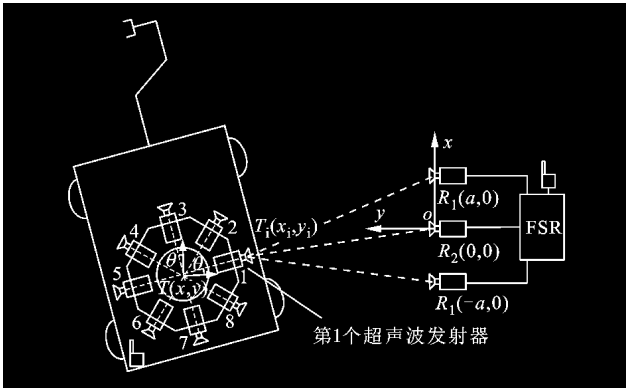
1.3 机器人定位中心

由于超声波发射器发射中心的位置关系已经确

定,因此只要确定机器人的定位中心与超声波发射器发射中心间的关系就可以了.将机器人上的8个发射器中与接收器 y 轴夹角最小的发射器发射,其他发射器不发射,测量这个发射器与接收器间的距离,确定这个发射器的空间绝对位置,并通过几何换算得到了机器人定位中心的空间绝对位置(见图3).

表1 同一点的FSRI法多次定位实验

t'_{cli}	t'_{c2i}	t'_{c3i}	x_i/cm	y_i/cm	q_i/cm
10 529	9 232	8 443	53.2	90.1	1.618
10 567	9 259	8 481	52.9	89.6	2.616
10 559	9 251	8 472	53.1	89.8	2.262



1~8:超声波发射模块中每个超声波发射器的编号; θ :负向夹角;

T_i :发射点; $T(x, y)$:机器人的定位中心点

图3 机器人定位中心与超声波发射器的关系

在图3中, $T(x, y)$ 和 T_i 间的距离为0.75 cm,从坐标系 y 轴的负向到第 i 个发射器的对称轴线,逆时针方向为正,即

$$\varphi_i = \theta + (i-1)45 \quad (5)$$

令 $\varphi_0 = \varphi_k$, $|\varphi_k| = \min\{|\varphi_i| \mid (i=1, \dots, 8)\}$, $k \in (1, \dots, 8)$,第 i 个发射器的发射点 $T_i(x_i, y_i)$ 与3个接收器间应该满足式(1). $T(x, y)$ 与第 i 个发射器的发射点间应该有

$$\left. \begin{aligned} x &= x_i + b \sin(\varphi_0) \\ y &= y_i + b \cos(\varphi_0) \\ b &= TT_i \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

联立式(1)与式(6)并根据实际情况可得

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{M}{2a(L_{1i} + L_{3i} - 2L_{2i})} + 7.5 \sin(\varphi_0) \\ y &= ((a^2(2L_{1i}L_{2i} + 2L_{2i}L_{3i} + 2a^2 - 2L_{2i}^2 - L_{1i}^2 - L_{3i}^2)^2 - M^2)^{1/2} / 2a(L_{1i} + L_{3i} - 2L_{2i})) + 7.5 \cos(\varphi_0) \\ M &= L_{1i}^2 L_{3i} - L_{1i}^2 L_{2i} + L_{1i} L_{2i}^2 - L_{2i}^2 L_{3i} - L_{1i} L_{3i}^2 + L_{2i} L_{3i}^2 + a^2 L_{1i} - a^2 L_{3i} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

根据式(7),机器人定位中心在空间的绝对位置就确定了.

2 ODMM 导航算法

在研究基于FSRI法绝对定位的基础上,进一步研究ODMM基于绝对定位的导航算法.机器人导航控制结构是由2个基于绝对定位的奔向目标和避障行为模块构成的包容式结构^[1],当奔向目标与避障行为发生冲突时,避障优先.

2.1 基于绝对定位的奔向目标行为

当ODMM未遇到障碍物时,采用绝对定位的奔向目标行为,机器人车体对称中心与车轮行进方向的夹角为 γ ,由机器人车体对称中心到车轮行进方向逆时针为正.全方位移动机器人的速度方向与 x 轴正方向的夹角为

$$\beta = \theta + \gamma \quad (8)$$

从 T 点到 G 点的直线 TG 与 x 轴正方向的夹角为 α ,由 x 轴正方向到 TG ,逆时针方向为正

$$\alpha = \begin{cases} \arctg\left(\frac{y_0 - y}{x_0 - x}\right) & x_0 > x \\ \pi + \arctg\left(\frac{y_0 - y}{x_0 - x}\right) & x_0 < x \end{cases} \quad (9)$$

在奔向目标行为定位后,期望的全方位移动机器人的速度调整方向角为

$$\delta = \alpha - \beta \quad (10)$$

当 $-\pi/2 < \alpha - \theta < \pi/2$ 时,让ODMM的4个车轮转向电机,同时调整 δ 即可.当 $\alpha - \theta < -\pi/2$ 或 $\pi/2 < \alpha - \theta$ 时,先让ODMM用0半径回转方式旋转 $\delta + \gamma$,再调整车轮让车轮行进方向与机器人车体对称中心夹角为0.在奔向目标的行为中,ODMM的速度为

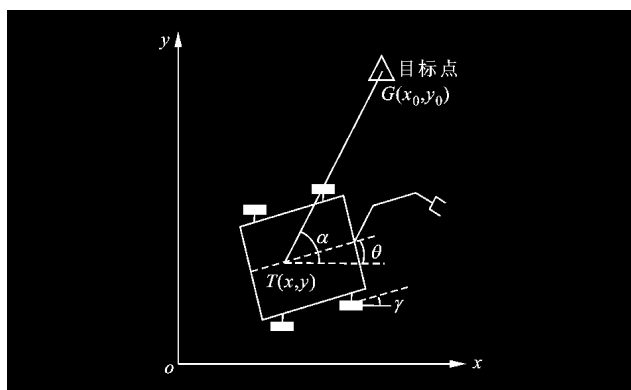
$$v_q = \begin{cases} v_0 & TG > d \\ v_1 & TG \leq d \end{cases} \quad (11)$$

式中: $v_0 = 0.5 \text{ m/s}$,为ODMM的最大运动速度; $v_1 = 0.1 \text{ m/s}$,为ODMM离目标比较近时的运动速度; d 为ODMM接近目标应该减速的临界距离.

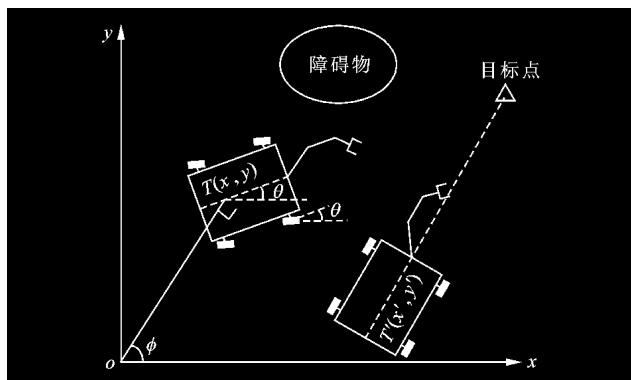
2.2 基于绝对定位的避障行为

当ODMM遇到障碍物时可采取基于绝对定位的避障行为,如图4所示.ODMM处于避障行为时的速度为 v_1 ,控制避障行为的芯片为ADUC812,该芯片与DSP2407间通过CAN总线进行通讯.ODMM的避障传感器为超声波避障模块URM37V3.1,在ODMM前方布置2个,左右各一个,由于URM37V3.1可以预先设置一个比较值,

对应的开关量信号为 0 和 1. 本文中设置的比较值为 0.5 m, 4 个超声波避障模块分别为左、前左、前右和右, 4 个超声波避障模块开关量输出引脚的信号分别记为 U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 , 将这 4 个模块的开关量引脚经与门送入 ADUC812 的一个外部中断引脚 $\overline{\text{INT0}}$ 与 P2.0 引脚, 同时将左模块与右模块开关量引脚分别接到芯片的引脚 P2.1 与 P2.2 上. 当 $\overline{\text{INT0}}$ 引脚接收到外部中断, 即 $U_1 \cap U_2 \cap U_3 \cap U_4 = 0$ 时触发避障行为, 接着 ODMM 进行避障. 首先, 判断 P2.2 引脚为 1 是否成立, 若成立 ODMM 就右转并向右运动(实时监控 P2.0 引脚), 当 P2.0 引脚信号变高时停止, 重新定位并规划运动轨迹, ODMM 跳出避障行为, 若不成立则继续往下判断. 接着判断 P2.1 引脚为 1 是否成立, 若成立 ODMM 就左转并向左运动(实时监控 P2.0 引脚), 当 P2.0 引脚信号变高时 ODMM 停止运动, 重新定位并规划运动轨迹, ODMM 跳出避障行为, 不成立则向下继续判断. 最后, 机器人后退(实时监控 P2.0 引脚)时, 当 P2.0 引脚信号变高时 ODMM 停止运动, 右转并向右运动 0.1 s 后, 再重新定位并规划运动轨迹.



(a) 奔向目标行为



(b) 避障行为

图4 机器人的2种行为模式

由 T 到 O 点的直线与 x 轴正方向的夹角为

$$\phi = \begin{cases} \arctg\left(\frac{y}{x}\right) & x > 0 \\ \pi + \arctg\left(\frac{y}{x}\right) & x < 0 \end{cases} \quad (12)$$

由 x 轴正方向到 TO 直线, 在 ODMM 避障时, 令其向左转、向右转的运动方向与其运动轨迹垂直, 则向右转的调整方向角

$$\sigma = \begin{cases} \frac{\pi}{2} - \phi - \beta & x > 0 \\ \phi - \frac{\pi}{2} - \beta & x < 0 \end{cases} \quad (13)$$

向左转的调整方向角为 $\sigma + \pi$, 当 ODMM 后退时的运动方向与原来运动方向相反时, 驱动电机为反向转动.

3 基于绝对定位的导航实验

基于 FSRI 法绝对定位的 ODMM 导航算法, 可以让机器人避开障碍物的同时迅速奔向目标.

3.1 机器人绝对定位导航仿真实验

仿真实验是模拟机器人在原点附近的任意位置上绕过障碍物, 运动到目标点 $G(300, 300)$ 的过程, 机器人的避障距离取 50 cm, d 取 25 cm. 当机器人远离障碍物与目标点时, 其速度为 v_0 , 定位周期为 0.3 s; 当机器人靠近障碍物与目标点时, 其速度为 v_1 , 定位周期为 0.25 s; 当机器人运动到目标点周围 1 cm 的范围内时, 即认为机器人到达了目标. 机器人在有障碍物的环境中奔向目标, 应用避障和奔向目标的行为策略顺利避开障碍物且快速奔向目标, 最终停在点 $G'(299.56, 299.17)$ 上, 满足了到达目标点的要求, 仿真结果见图 5.

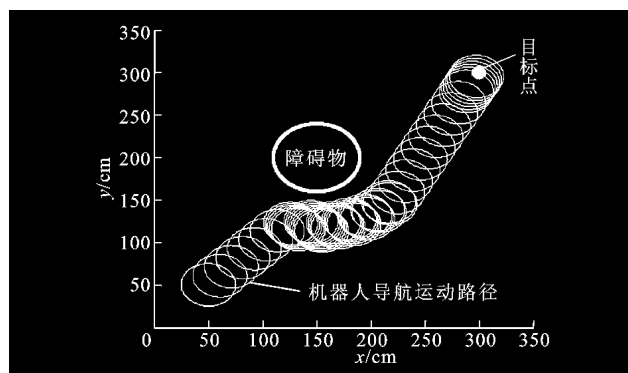


图5 机器人导航仿真实验

3.2 机器人绝对定位导航实验

绝对定位对 ODMM 的导航具有重要意义. 本文允许观众观全方位移动机器人先通过绝对定位确定自己在空间的位置, 采用奔向目标策略到达点 O ,

80)后,调整车体姿态使 $\theta=0$, $\gamma=0$, 然后沿 $y=80$ cm 的直线向 x 轴正向方向运动. ODMM 在跟踪机器人的直线轨迹时,速度约为 0.2 m/s,每隔 0.5 s 定位一次,调整 γ 一次. γ 的调整策略为:当 $y<80$ cm 时, γ 增加 3.6° ; 当 $y\geq 80$ cm 时, γ 减小 3.6° . 实验结果如图 6 所示.

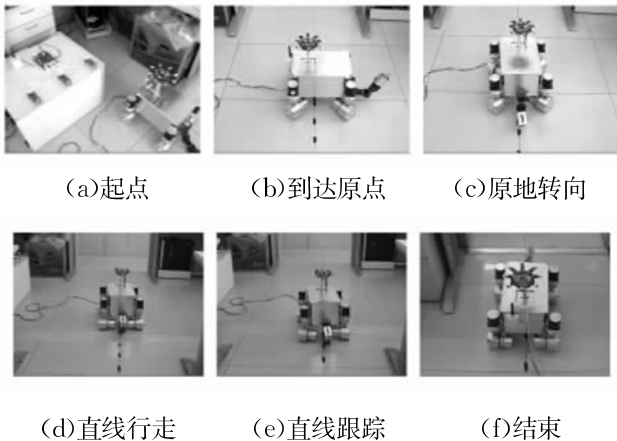


图6 机器人的直线跟踪导航实验

由实验可知,ODMM 在奔向目标时的运动精度很高,而跟踪机器人作直线运动时,其精度略有下降,原因是奔向目标时的目标点明确,而跟踪直线时无固定的目标点.

4 结束语

本文基于 FSRI 法搭建了 ODMM 的绝对定位系统,并做了定位精度实验,实验证明 FSRI 法能够提高 ODMM 的绝对定位精度. 本文还将 FSRI 法的绝对定位应用到 ODMM 导航中,提出了基于绝对定位的奔向目标与避障的导航算法,通过仿真与实验,证明了基于绝对定位的导航算法是正确的.

参考文献:

- [1] 李磊,陈细军,曹志强,等. 一种室内轮式自主移动机器人的导航控制研究[J]. 自动化学报, 2003, 29(6):893-899.
LI Lei, CHEN Xijun, CAO Zhiqiang, et al. Research on the navigation control of an indoor wheeled autonomous mobile robot [J]. Acta Automatica Sinica, 2003, 29(6): 893-899.
- [2] 段勇,徐心和. 基于不确定网格地图的移动机器人导航[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(6):1009-1013.

- DUAN Yong, XU Xinhe. Navigation for mobile robot based on uncertainty grid-map [J]. Control Theory & Applications, 2006, 23(6):1009-1013.
- [3] TU Kouyang, JACKY B. Fuzzy potential energy for a map approach to robot navigation [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2006, 54:574-589.
- [4] DUAN Fang, LIU Jianye, YU Feng. LEO autonomous navigation based on image motion [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005, 22(2):165-169.
- [5] HAYET J B, LERASLE F, DEVY M. A visual landmark framework for mobile robot navigation [J]. Image and Vision Computing, 2007(25):1341-1351.
- [6] 高庆吉,洪炳熔,阮玉峰. 基于异构双目视觉的全自主足球机器人导航[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(9):1029-1032.
GAO Qingji, HONG Bingrong, RUAN Yufeng. Navigation of small-size autonomous soccer robot based on iso-vision system with two cameras [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(9):1029-1032.
- [7] 衣晓,何友,关欣. 多传感器组合导航系统分层融合算法[J]. 宇航学报, 2003, 24(2):156-161.
YI Xiao, HE You, GUAN Xin. Hierarchical fusion algorithm for multi-sensor integrated navigation system [J]. Journal of Astronautics, 2003, 24(2):156-161.
- [8] 袁冬莉,闫建国,王新民,等. 无人机组导航系统信息融合方法研究[J]. 西北工业大学学报, 2006, 24(5): 558-561.
YUAN Dongli, YAN Jianguo, WANG Xinmin, et al. Research on information fusion method about unmanned aerial vehicle integrated navigation system [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2006, 24(5):558-561.
- [9] TONG F, TSO S K, XU T Z. A high precision ultrasonic docking system used for automatic guided vehicle [J]. Sensors and Actuators, 2005, 118(A):183-189.
- [10] MARTIN J M, JIMENEZ A R, SECO F, et al. Estimating the 3D-position from time delay data of US-waves: experimental analysis and a new processing algorithm [J]. Sensors and Actuators, 2003, 101(A): 311-321.

(编辑 管咏梅)