文章编号: 1002-0446(2006)03-0344-06

基于视觉和里程计信息融合的移动机器人自定位*

罗 真, 曹其新
(上海交通大学机器人研究所, 上海 200030)

摘 要: 受鸽子定向启发,将装备有全维视觉和里程计等传感器的自主移动机器人的自定位分为两种模式:全维视觉定位模式和里程计定位模式. 机器人依据一定准则选择具体的主导定位模式:先试视觉定位,若视觉定位不可得或获得的视觉定位不可靠,则采用里程计定位. 针对标记物信息失真问题,应用初步视觉定位结果反推标记物理论值,然后通过比较从原始图像中分离出的可能的标记物信息和反推出来的标记物信息理论值,滤除不可靠的视觉定位. 针对运动过程中的机器人自定位,分析了影响定位准确性的信息时间延迟因素.

关键词: 自定位; 移动机器人; 全维视觉; 里程计
中图分类号: TP24 **文献标识码**: B

Self-localization of Mobile Robot Based on Vision and Odometer

LUO Zhen, CAO Qi-xin
(*Research Institute of Robotics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China*)

Abstract: Inspired by orientation sensation of pigeon, we divide the self-localization approach of mobile robot with omni-vision and odometer into two modes: mode based on omni-vision and mode based on odometer. The robot selects its concrete self-localization mode at certain time according to a certain rule. Firstly, the robot attempts to use the omni-vision information to localize itself. If there is not enough vision information to localize itself, or the reliability of the omni-vision based self-localization cannot be accepted, the robot uses the odometer information to localize itself. For the problem of landmark information distortion, it calculates the theoretic values of landmarks based on the initial visual self-localization results, and compares the theoretic values with the possible values of landmarks extracted from the raw images to filter out the unreliable vision-based self-localization. To gain exact self-localization of moving robot, factors of time delay that affect the precision of self-localization is analyzed.

Keywords: self-localization; mobile robot; omni-vision; odometer

1 引言 (Introduction)

自定位问题是移动机器人研究领域中一个比较热门的议题. 实现准确的自定位是移动机器人完成自主路径规划、避障等任务的要求,是多移动机器人实现较为复杂的协作任务的基础.

移动机器人所采用的自定位技术与机器人配备的传感器密切相关[1]. 目前,在移动机器人上使用较多的传感器有视觉传感器、里程计和惯导系统、超声波传感器、激光测距仪、GPS定位系统、RFID定位系统等. 其中,视觉传感器因具有信息量大、感应时间短等优点,随着计算机运行速度的提高,在自主移动机器人上应用越来越广泛;超声波传感器、激光测距仪等传感器因信息单一、感应周期长,目前逐渐沦为辅助性的定位传感器;里程计是一种相对定位传感器,特点是传感数据具有时间历史相关性,这使得它一方面存在累积误差问题,难以独立进行精确定位,另一方面可结合绝对定位传感器如视觉定位传感器等提供较准确的定位. 目前的移动机器人往往同时装备多种传感器.

事实上,在自然界中,有许多生物拥有多个冗余的传感器,如文[2]报告说鸽子具有 4个以上的方向传感系统 (如与内部生物钟对照的太阳位置),并且

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60443007).
收稿日期: 2005-04-30

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

这些传感系统似乎并非组合在一起工作,而是根据环境条件和传感器子系统的运作水平,由某个传感器起支配作用.受此启发,本文采用的基于全维视觉和里程计信息融合的移动机器人自定位算法的基本思想为:在特定条件下,定位由其中的一种传感器起主导作用.

对于应用视觉信息进行机器人自定位的问题,已有较多研究,比如马建光等探讨了一种主成分分析法[3],但是该方法只适用于遮挡很少的静态环境.一种常用的自定位思路是应用移动机器人活动场所的固定对象作标记物进行机器人自我定位,比如在典型的移动机器人研究环境 RoboCup中型组比赛中,机器人往往利用球门、角柱、白线等场地固定对象进行自定位[4,5].有许多 RoboCup中型组队伍提到应用全维视觉和里程计信息实现机器人定位,并发展了多种有效的定位方法,比如 Motomura等介绍了一种利用两个标记点和航位推测法在时空中进行迭代计算获取定位的方法[6].

本文结合研发实践,探讨 RoboCup中型组足球机器人自定位中遇到的问题,介绍了一种在决策级进行多传感器信息融合的有效的定位解决方法.文章给出了视觉定位和总体融合定位算法的细节,并分析了在机器人高速运行情况下影响定位准确度的信息延迟时间因素.

2　基于全维视觉的三角定位(Triangle localization based on omni-vision)

全维视觉的特点是一次成像就能感知到周围景物,有助于增强机器人实时反应能力."交龙"自主移动机器人上安装了反射镜为分段光滑锥形镜面的全维视觉系统,如图 1所示.

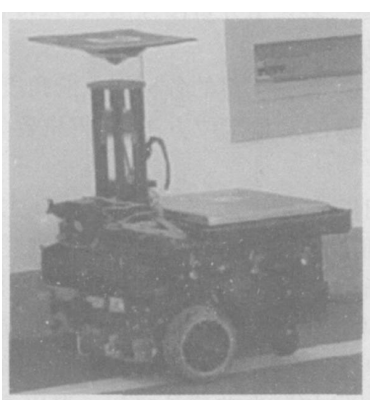

图 1　机器人

Fig 1　Robot

为解决机器人自定位问题,研究中提取场地固定对象——球门和角柱——作为固定标记物进行定位.常用的定位方法是三角定位方法.因表面看来机器人到标记物的距离信息很容易提取,最初机器人球队就是使用这种距离信息来进行三角定位,例如在图 2中,若机器人知道线段 AD和 AC的长度,加上 CD是事先已知的,理论上就可以确定出机器人 A的位置坐标.但通过实验发现:定位误差总是很大,而且获得的定位数值很不稳定,尤其是在有其它机器人遮挡住标记物一部分情况下,误差达几米,且定位数值常常跳跃.

仔细分析原因可知,前述定位方法首先原理上有问题,比如当机器人 A处于 $DD'E'E$方形区域中时,在没有遮挡物的条件下,机器人 A看到的最近的"D'"点并非真正的"D"点,而是在球门凹形底边地平线上的一点,是个伪"D'"点,且该点实际位置随 A的位置不同而不同;其次,由于噪声影响和其它机器人对标记物的部分遮挡作用,即便是那个伪"D'"点也难以准确提取出来.

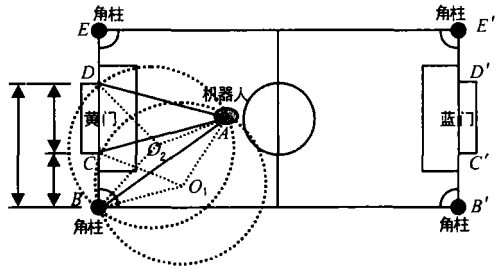

图 2　利用标记物角度信息的三角定位示意图

Fig 2　Triangle localization with angle information of landmark

根据全维视觉成像原理可知,伪"D'"点、真正的 D点和机器人全维视觉中心在一条直线上,即伪"D'"点和 D点针对全维视觉中心的角度相同;其次,场上其他机器人往往只遮挡住标记物的底部,而遮不住标记物上部,这意味着在视觉图像中往往有许多和 B、C等标记点具有相同视觉角度的点存在;而且,由于与标记点有相同角度的点很多,噪声不容易掩盖掉标记点的角度信息.据此,本文采用基于标记物视觉角度信息和固定标记物间事先已知的方位信息进行机器人自定位的方法.

该方法基本原理如图 2所示.机器人以全维视觉中心为原点建立极坐标系,在极坐标系中应用团块提取方法获得标记物的角度信息,即 $\angle BAC$、$\angle BAD$等.另一方面,B、C、D、E等标记点的位置关系

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

事先已知,即 BC、BD 等线段长度事先已知. 根据几何原理,在已知 BC 和 $\angle BAC$ 且点 A、B、C 不在一条直线上的情况下,可以确定一个圆 O_1;同理可以确定另一个圆 O_2;两个相交圆可以确定两个交点:其中一个交点为已知的 B 点,另一点为机器人位置 A 点. 有多种具体的求解方法,如:先求出两个圆的圆心坐标,获得经过两个圆心的直线,而两圆的两个交点中的一个为位置坐标已知的标记点,最后求出这个标记点关于该直线的对称点的坐标,即为机器人的当前位置.

应用基于角度信息的三角定位方法,在 5m ×8m 球场里,在全维视觉能捕捉到标记物的位置,"交龙"机器人的 x、y 坐标定位精度可达 10cm 量级,朝向定位误差小于 3°.但由于视野有限、障碍物阻挡视线影响标记物提取等原因,在场地中很多位置无法可靠捕捉到足够多的标记物,即在这些位置机器人无法获得足够的视觉信息进行三角定位.

3 定位完整算法(The whole algorithm of self-localization)

如前所述,受全维视觉硬件限制,机器人并不是在球场上的每个地方都能获取足够多的标记物信息,即存在视觉定位的盲区. 而且,球场是一个激烈对抗的赛场,上面有多个机器人存在,不可避免地会出现其它机器人遮挡住固定标记物一部分的情况,这会使机器人获得的视觉定位依据产生失真,从而影响视觉定位的可靠性.

解决这些问题的一种方法是引入里程计. 在本研究中,里程信息由以 DSP 板构成的下位机通过统计附着在驱动电机上的编码器获得,信息内容包括里程变化、速度等. 下位机获得里程信息后通过 RS232 口传给由 PC 机构成的上位机,其中,上位机负责视觉信息处理和实现机器人的最后自定位. 当机器人发生打滑等情况时,里程计会产生较大的误差. 实际应用过程中,机器人的碰撞、高速转弯等行为易使里程计信息产生较大的累积误差. 这里不给出里程计信息获取过程的详细描述.

视觉和里程计融合定位的基本思想是:在无法应用全维视觉信息进行定位或者视觉定位不可靠的情况下,机器人改用里程计信息进行定位. 全维视觉定位的特点是,它是一种绝对定位方法,一旦获得,定位准确而且和历史情况无关,但是受限于各种干扰因素和自身镜面镜头等,在很多位置无法获取足够多的准确的环境信息进行定位;里程计定位的特点是,它是一种相对定位方法,定位数据是时间历史的累积,一般地,误差随时间的累积而增大. 本文工作的目的是结合这两种定位的优势:用全维视觉获取准确的绝对定位,作为里程计定位的新的基准点,以使从某定位基准点开始以来的里程计连续定位的时间段保持在较短范围内,使得里程计的累积误差保持在小范围之内.

3.1 基本算法流程

融合了全维视觉和里程计信息的定位算法基本流程如图 3所示.

首先,机器人根据历史定位数据和里程计信息估计出机器人的当前位置 X'_{k+1}:

$$X'_{k+1} = X_k + (t_\beta - t_k)/(t_\beta - t_\alpha) \times (Xodo_\beta - Xodo_\alpha) + (Xodo_{j1} - Xodo_\beta) + (t_{k+1} - t_{j1}) \times U_{j1}$$

其中,X'_{k+1}、X_k、$Xodo_{j1}$、$Xodo_\alpha$、$Xodo_\beta$ 为三元组(x坐标,y坐标,角度),U_{j1}为三元组(x方向线速度,y方向线速度,角速度);t_{k+1}为当前时刻;X_k 为上一次的定位数值,t_k 为上一次定位的时刻;$Xodo_{j1}$为最近的里程计定位值,t_{j1}为最近的里程计定位时刻,U_{j1}为当前机器人速度;t_α和 $Xodo_\alpha$分别为早于 t_k 且最接近 t_k 的里程计定位时刻和定位值;t_β和 $Xodo_\beta$分别为晚于 t_k 且最接近 t_k 的里程计定位时刻和定位值. 考虑到机器人的加速度不是很大,加减速的影响较小,所以本文研究中加以忽略.

第二步,根据连续使用里程计进行定位的次数(时间长度),决定不同的标记信息获取方式:若已长时间用里程计定位,则根据各标记物的颜色、面积等特征假定估计各标记物,获得各标记点的假定估计的视觉角度值;否则根据估计出的机器人当前位置 X'_{k+1},推算出各个标记点在视觉图像中的理论角度值,根据这些理论值分析图像团块,获得各标记点的实际的视觉角度值.

第三步,根据获得的各标记点的角度值,应用基于角度信息的三角定位方法,获得机器人的初步视觉定位 X''.

第四步,滤除不可靠的视觉定位. 主要方法是:根据 X 推算出第 4个标记点的理论视觉角度值,计算这个标记点的实际视觉角度值与理论视觉角度值的偏差,偌偏差大于某阈值,则认为视觉定位不可靠,改用里程计定位;否则,认为视觉定位是可靠的,这时,应考虑进信息获取的时间延迟因素,获得机器人的定位. 附注:$f_{X\,th}$是个阈值函数,值和连续使用里程计进行定位的次数有关.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

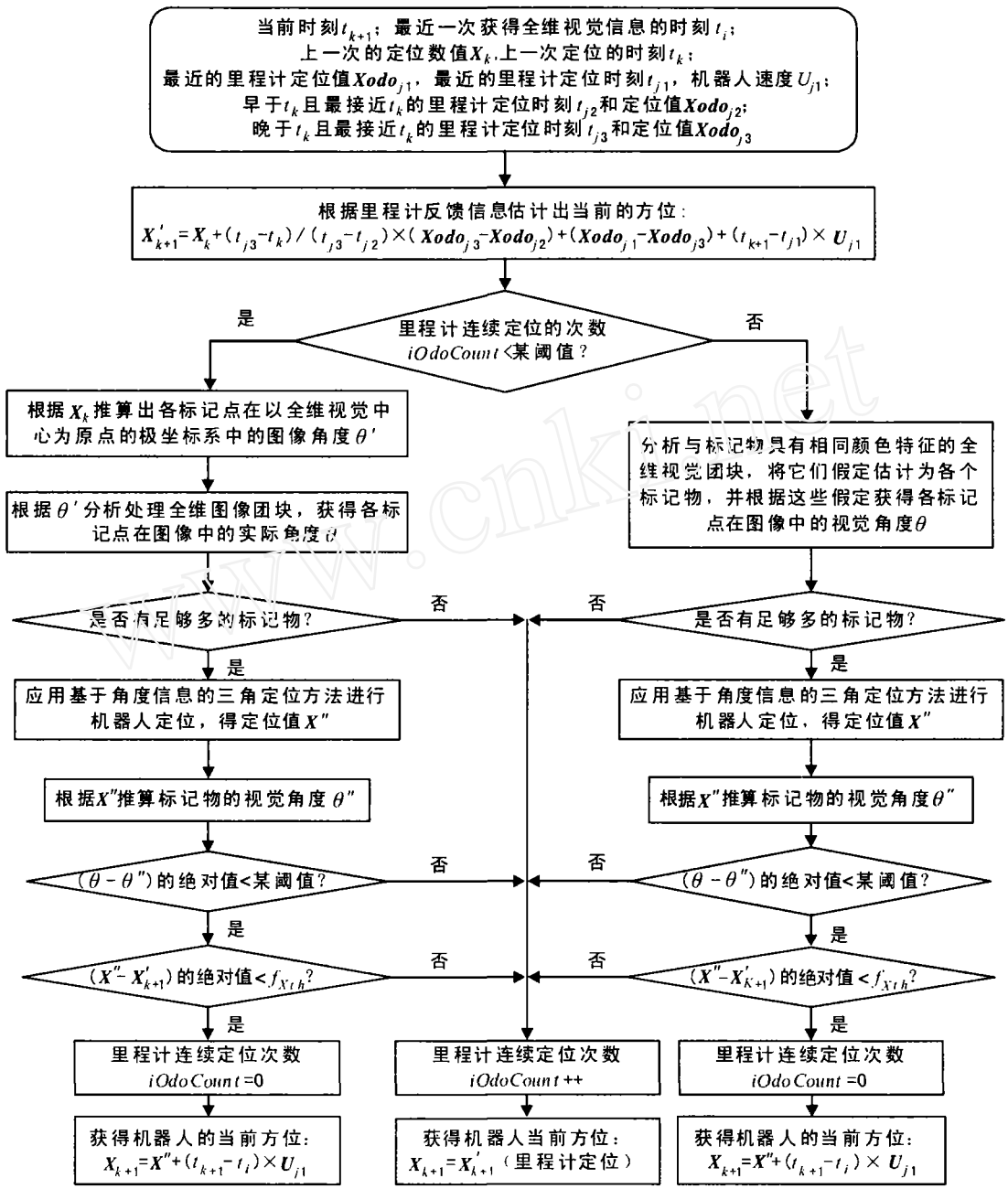

图 3　机器人自定位流程图

Fig 3　Flow chart of robot self-localization

3.2　影响运动中定位精度的时间因素

机器人进行自定位,所依托的数据实际上是前一时刻获取的.这对于静止或慢速的机器人来说,问题不大,但对于以较快速度运行的机器人来说,影响就比较大,比如若机器人以 2m/s的速度运行的话,100ms的延迟时间可导致达 0.2m的定位偏差.所以必须考虑传感器信息的时间延迟因素,以加入补偿.

系统运行中产生的时间延迟有如下几种:

(1) 摄像机获得一帧图像数据后,通过一定接口传递给计算机的时间 T_{SV}:比如,通过 USB1.0接口传递一帧未经压缩的分辨率为 320 ×240像素的 24位彩色图像至少需 153ms

(2) 处理图像数据,分离出所关心的对象的处理时间 T_{Deal}:比如,在我们的实验平台中 (配置 2.0 GHz的 P4笔记本电脑),应用基于极坐标系的团块方法从视觉图像中分离出所关心的场上对象,平

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

均约需要 14ms时间.

(3) 分离出视觉对象到定位完成的时间 T_{Loc}:由于要完成一个任务,机器人需要处理多个问题,这些问题分别用不同的线程完成,比如图像处理问题和定位问题.这使得分离出场上对象后往往不是立即用于自定位计算.

(4) 串口通信延迟 T_{OSD}:下位机通过串口向上位机传递里程信息,实验中定义了一个 27字节的通信数据帧,在 19200bit/s的串口上传递一个数据帧至少需要 11ms

(5) 上位机收到里程计信息到应用该信息完成定位的时间 T_{OP}.

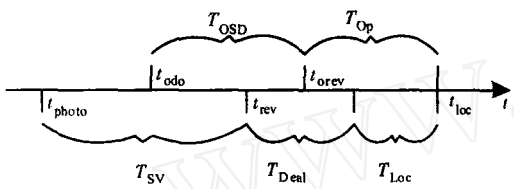

图 4 自定位中的时间延迟

Fig 4 Time delay in self-localization

图 4中, t_{odo}为里程计信息生成的真正时刻, t_{orev}为机器人上位机收到里程计信息的时刻; t_{photo}为摄像机曝光采集一帧图像时的真正时刻, t_{rev}为上位机收到视觉图像时的时刻; t_{loc}为当前定位时刻.

4 实验 (Experiment)

本文实验所依托的机器人平台为上海交通大学自己开发的自主移动机器人.该机器人含有由 DSP板构成的下位机和由笔记本电脑构成的上位机.上位机里运行智能系统软件,负责实现视觉信号处理和机器人的准确自定位;下位机负责底层运动控制,并根据驱动电机的编码器反馈信号合成里程信息;上下位机通过串口进行通信.

实践证明本文阐述的定位方法能满足自主型足球机器人团队协作对机器人自定位的要求.图 5是一次机器人自定位实验测试的结果.其测试条件为:大小为 5m ×8m的机器人足球场,场地中散布着影响机器人视线的物体 (5台其它机器人:场地中间、两个门前、其中的两角柱附近);全维视觉分辨率为 320 ×240像素;全维反射镜为一种自制的分段光滑锥形镜面.其测试方法为:让机器人以 0.3m/s的线速度走一条曲线,机器人记录运动过程中的自定位数据,将自定位数据与该机器人轨迹曲线的实测值进行比较 (由于难以获得运动中的机器人在某个瞬间的真实位置,故采用此处的测试方法).在本次实验测试中,机器人总共进行了 416次定位,其中,视觉定位 181次,里程计定位 235次.

从图 5中可见,总体上,定位值与实际情况符合程度比较好.但有少数几个孤立的定位数据与实际位置有较大的偏离;估计这是由于地面不是很平造成机器人震动,而所用的全维视觉系统又不是固定死的 (为拆卸运输的便利),使得锥面反射镜与摄像机镜头之间发生相对晃动造成的.

实际上,视觉定位的精度受制于每个像素所对应的区域的大小.在本文所用的全维视觉系统中,每个像素所代表的地面上的区域可达数十厘米 ×数十厘米见方,且离视觉中心不同距离的像素点所对应的空间尺寸不同,比如,在离视觉中心 30个像素远 (2m远)的位置,一个像素代表约 8cm ×8cm的区域,而在离视觉中心 64个像素远 (5.5m远)的位置,一个像素代表约 25cm ×25cm的区域.故而处于不同的场地位置,机器人视觉定位的精度略微不同.

另,在实际应用中,在全维视觉系统硬件确定的情况下,场地尺寸、场地里的障碍物的数量和形状、光线条件等直接影响了机器人对标记点的提取,从而影响机器人获得全维视觉定位的可能性,进而会影响机器人的定位精度.

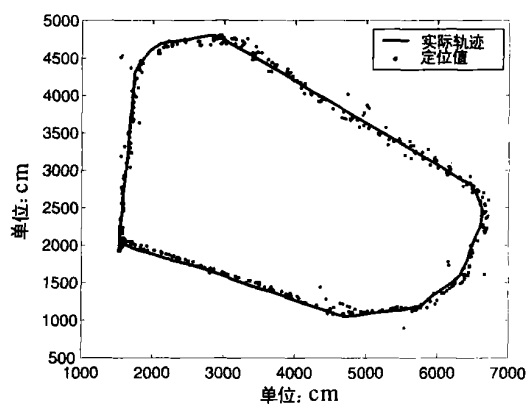

图 5 机器人自定位实验测试结果

Fig 5 Experiment result of robot self-localization

5 结论 (Conclusion)

本文详细探讨了融合全维视觉和里程计进行机器人自定位的一种方法.受鸽子定位的启发,本文将机器人自定位分为两种模式:全维视觉定位模式和里程计信息定位模式.通过将这两种定位模式有机

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

地结合在一起,实现了稳定可靠的机器人自定位.针对环境存在动态视觉障碍可能会使获得的标记物信息失真的问题,文章应用初步视觉定位结果反推标记物信息,通过比较从原始图像中分离出的标记角度信息和反推出来的标记角度信息,滤除不可靠的视觉定位,增强了定位的可靠性.文章还讨论了影响定位精度的传感器数据信息传递和处理时间延迟.

本文所讨论的方法能较好地满足足球机器人团队协作对机器人定位精度的要求.不过有一种情况下,机器人自定位会不准确:机器人刚好处于视觉定位的盲区,而且由于激烈地争球对抗等原因导致机器人被其它机器人架起,使得驱动轮离地导致里程计亦不可靠.不过,在这种情况下裁判员会要求将机器人分开,由于全维视觉定位盲区不大,很容易重新获得准确定位;另一种解决思路是加装随动轮,将里程信息传感器装在随动轮上,而不是利用驱动电机编码器反馈作为里程计信息的来源.

参考文献 (References)

[1] Iocchi L, Nardi D. Hough localization for mobile robots in polygonal environments[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2002, 40(1): 43 - 58.

[2] Kreithen M L. Orientational strategies in birds: a tribute to W. T. Keeton[A]. Aspey W P, Lustik S I Behavioral Energetics: the Cost of Survival in Vertebrates[M]. Columbus, OH: Ohio State University Press, 1983. 3 - 28.

[3] 马建光,贾云得. 一种基于全向摄像机的移动机器人定位方法[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(3): 317 - 321.

[4] Ozawa N, *et al* WinKIT 2004 Team Description[EB/CD]. http://www.robocup.org, 2004.

[5] Pagello E, Menegatti E, D'Angelo A. The Artisti Veneti 2004 Middle-Size Team[EB/CD]. http://www.robocup.org, 2004.

[6] Motomura A, Matsuoka T, Hasegawa T. Self-localization method using two landmarks and dead reckoning for autonomous mobile soccer robots[A]. RoboCup 2003 Symposium[C]. Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. 526 - 533.

作者简介:

罗　真 (1974-),男,博士生. 研究领域:自主式移动机器人智能控制.

曹其新 (1960-),男,博士,博士生导师. 研究领域:机器视觉与识别,基于网络的机器人智能控制,智能娱乐机器人.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net