

基于 Kinect 的主动式伴舞机器人的研究与设计

罗瑞琨^{1,2}, 魏有毅², 尹华彬³, 徐 静^{1,2}, 刘 召², 刘 峰², 陈 恩^{1,2}

(1.清华大学 摩擦学国家重点实验室, 北京 100084; 2.清华大学 机械工程系, 北京 100084;

3.成都飞机工业(集团)有限责任公司 制造工程部, 四川 成都 610092)

摘 要:开发了一种基于 Kinect 传感器的主动轮式伴舞机器人。机器人在与人直接接触的条件下共同舞蹈, 达到对老年人、病人进行康复训练的目的。由于适用人群力量不足, 提出了采用全向轮结构的主动式机器人; 然后, 提出了全向轮式机器人运动控制算法。此外, 提出了采用 Kinect 传感器的人腿识别定位算法, 该算法主要包含背景去除、双腿识别、姿态识别三个步骤, 利用逐行扫描的方法实现了对人双腿的实时识别与定位。最后, 通过与机器人共同舞蹈实验, 验证了视觉算法的稳定性和准确性。

关键词:伴舞机器人; 人-机器人协作; Kinect; 姿态识别

中图分类号:TH16; TP216 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3997(2013)06-0001-03

Study and Design of Active Dancing Partner Robot Based on Kinect

LUO Rui-kun^{1,2}, WEI You-yi², YIN Hua-bin³, XU Jing^{1,2}, LIU Zhao², LIU Feng², CHEN Ken^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2.Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3.AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd, Sichuan Chengdu 610092, China)

Abstract: A wheeled active type dancing partner robot based on Kinect sensor is developed. By dancing in cooperation with a human through direct physical interaction, the robot can help the old and patient with rehabilitation training. Because of the target users' weakness in physical strength, an active type of wheeled omni-directional robot structure is presented. Then, omni-directional motion control algorithm is presented. Furthermore, a human leg detection and localization algorithm via Kinect sensor is developed which includes three steps: background removal, leg identification, and pose determination. The line-by-line method is used to realize real-time human leg detection and localization. Finally, by actual experiment of dancing with the author, the stability and accuracy of the vision algorithm is verified.

Key Words: Dancing Partner Robot; Human-Robot Interaction; Kinect; Pose Detection

1 引言

机器人目前已经广泛的应用在工业领域, 来提高生产效率, 产品质量以及降低成本。随着人口老龄化问题的出现, 世界各国的科学家在努力研究机器人在家庭, 医疗, 公共场所等领域内的应用。这类应用中需要机器人与人类进行近距离的接触, 这样安全问题就显得尤为重要。因此机器人-人协作成为了该类研究的重点。目前已有很多实验室进行机器人-人协作的研究, 如 Kazerooni 开发了能够增加人体力量的机器人^[1], 日本某公司开发了可穿戴机器人一些科研人员开发了可以和人一起搬运物体的移动机器人文献^[2]。人机协作主要要求机器人能够实现对人的行为的识别及理解, 能够实现对人类运动进行捕捉。在此背景下, 伴舞机器人应运而生^[3]。伴舞机器人除了可以为人类提供娱乐之外还可以帮助病人进行康复训练, 这种康复训练比传统的运动康复训练更有乐趣。同时伴舞机器人可以陪伴老年人、残疾人跳舞, 让老年人、残疾人找到自信与生活的乐趣。此外, 伴舞机器

人的研究包含了机器人对人类步态的识别, 机器人对人类的伴随运动等研究方向。这些研究方向在未来可以使得机器人更好的帮助人类。

伴舞机器人核心是人体运动的感知与预测。近年来人体感知技术不仅在 3D 电影等娱乐领域有着重要应用, 更是机器人领域内有着重要的作用, 特别是机器人-人协作领域内有着重要意义。目前已经有诸多成熟的人体感知系统, 如常见的立体环境系统^[4], 即在室内布置多个相机或红外线传感器来对该空间内人的行为进行捕捉。激光雷达^[5]与立体视觉^[6]也常用于移动机器人定位与目标识别, 然而这类系统都有各自的缺点。微软公司在 2011 年推出了 Kinect 人体感知传感器, 这款传感器主要由一个 CMOS 照相机和一个结构光深度相机及一个麦克风阵列构成^[7-9]。目前使用 Kinect 进行人体感知主要是通过获得全身图像后进行识别。在某些情况下, 无法获得全身图像, 这就需要能够从身体部分图像中对人体进行识别。一些科研人员提出了人腿下肢的识别方法^[9], 然

来稿日期: 2012-08-07

作者简介: 罗瑞琨, (1989-), 男, 吉林人, 本科, 主要研究方向: 机器视觉;

徐 静, (1980-), 男, 江苏人, 博士, 副教授, 主要研究方向: 机器人, 机器视觉

而这种方法速度较慢,无法实现实时处理。

针对上述问题,提出了基于逐行扫描的人腿姿态实时识别算法。通过与机器人共同舞蹈实现,验证了视觉算法的稳定性和精度。

2 伴舞机器人运动控制

所研究的主动式伴舞机器人是和男性舞伴一起跳交际舞的机器人。为了实现全向运动,采用三个全向轮结构。

为了实现机器人能够伴随男性舞蹈者在地面上自由的运动,要求机器人能够实现在平面内的全向运动,即实现任意平移和旋转运动。本机器人采用全向运动控制方法,三个轮子轴线相交于一点,轮子采用全向轮,这样可以将机器人的平移和旋转运动分解开,如图 1 所示。其中 Σ 为机器人坐标系, $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 为轮子中心到机器人坐标系原点与 X 轴正方向所夹角度, α, β, γ 为轮子切线方向与 X 轴正方向夹角, L_1, L_2, L_3 为轮心到机器人坐标系原点的距离。

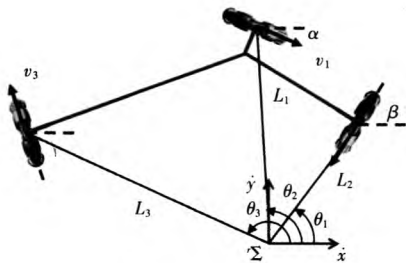


图 1 机器人坐标系
Fig.1 Robot Coordinate Frame

假设三个车轮的线速度为 $[v_1, v_2, v_3]^T$, 机器人在平面内的速度为 $[\dot{x}, \dot{y}, \dot{\omega}]^T$, 则机器人的三个速度分解为三个车轮的线速度为:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & -L_1\cos(\theta_1-90^\circ+\alpha) \\ -\cos\beta & -\sin\beta & -L_2\cos(\theta_2+90^\circ+\beta) \\ -\cos\gamma & \sin\gamma & -L_3\cos(270^\circ-\theta_3-\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} \quad (1)$$

3 Kinect 安装位置

采用 Kinect 获得的深度图来识别人腿。因为 Kinect 的有效距离是 50cm 以上。所以将 Kinect 安装在机器人前部,距离男性舞蹈者距离为 80cm 左右。为了获得背景简单的图像,故将 Kinect 安装在距地面 10cm 左右的平台上,同时 Kinect 倾角为向下 10° 。

4 基于逐行扫描的人腿姿态识别算法

采用逐行扫描人腿识别算法,以实现实时识别视觉系统。采用有 Kinect 获得到 (640×480) 像素的原始深度图像作为数据输入,通过背景消除,人腿识别,姿态识别三步对人腿进行识别和定位。人腿识别算法流程,如图 2 所示。

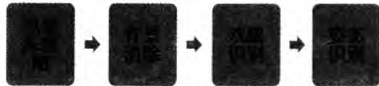


图 2 人腿识别算法流程
Fig.2 Algorithm Flowchart of Leg Identification

4.1 背景消除

因为 Kinect 传感器采用结构光原理获取三维信息,所以会出现大量的噪点。故需要对其进行降噪滤波。Kinect 获得的原始

深度图中,无法测量的点的深度值为 -1,滤波时赋值为 0。考虑到男性舞者和机器人间的距离一般在 1m 以内,所以将距离大于 1.5m 的像素点的深度值赋值为 0。

因为 Kinect 的安装位置使得原始深度图中只有男性舞者,地面以及部分机器人机械结构。将地面,机器人机械结构作为背景,可以对获取到的原始深度图进行背景消除,这样可以得到人的腿部,如图 3 所示。Kinect 的 RGB 摄像头拍摄到的图像,如图 3 (a)所示。Kinect 获得的原始深度图,如图 3(b)所示。从图中可以看到我们已经获得了只有腿部的深度图。由图 3(c)得到的深度求和图,如图 3(d)所示。

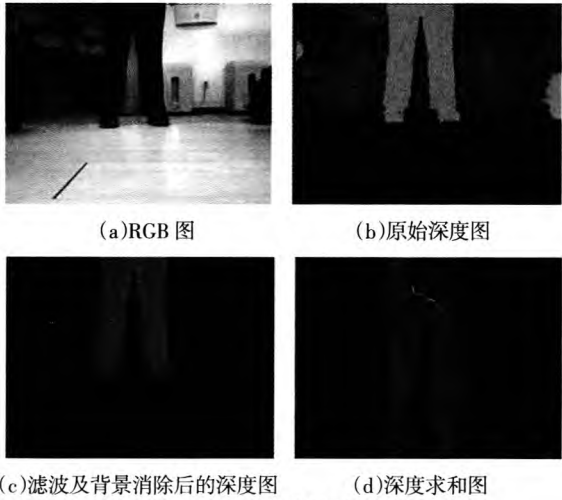


图 3 算法界面
Fig.3 Algorithm Interface

4.2 基于逐行扫描的双腿识别算法

由于深度图中存在坏点和噪声,同时为了保证算法的实时性,采用对深度图求和图的方法来获取双腿的特征。因为人腿近似为圆柱且双腿中间会有一定间隙,所以对深度图求和图后会出现两个峰值。通过对获得的求和图进行逐行扫描可获得双腿的检索号继而识别双腿。

4.2.1 对深度图求和图

在 (640×480) 像素的深度图中,以 Δl 为间隔,分成 $640/\Delta l$ 个条状区域,从左到右依次编号为 $1, 2, \dots, 640/\Delta l$ 。求出每个条状区域内所有像素点的深度值总和,即:

$$D_i = \sum_{j=\Delta x(i-1)}^{\Delta x(i+1)-1} \sum_{k=1}^{480} d_{j,k} \quad (1)$$

式中: D_i —第 i 个区域内深度的权重,对 $D_i (i=1, 2, \dots, 640/\Delta l)$ 进行归一化处理,得到归一化之后的 $D_i\%$, 即: $D_i\% = \frac{D_i}{\text{Max}(D_i)}$ 根据可以画出深度图的求和图,如图 3(d)所示。

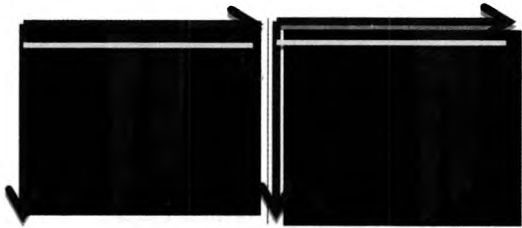
间隔 Δl 的大小决定了测量识别的精度。 Δl 过大,双腿合并时双峰特征变得不显著,无法区分。 Δl 过小时,由于深度图中存在被滤波为零的噪点和坏点,得到的求和图中存在大量的毛刺,特征依然不显著。同时 Δl 减小时,区域的数量增加,扫描算法速度将会降低。

通过对深度图求和图并归一化,我们将深度图变换为表达了双腿特征的求和图中。这样深度图被分成了 $640/\Delta l$ 个长方形,且长为深度图的宽度即 480,宽为 Δl 。求和图中每个组的编号为图像中该区域所对应的索引号,即 $1, 2, \dots, 640/\Delta l$ 。

4.2.2 逐行扫描识别双腿算法

通过逐行扫描的方法来求出图像中表示双腿的区域索引号,依次为 index1,index2,index3,index4。其中 index1 和 index2 表示左腿的区域,index3 和 index4 表示右腿的区域。

求和图按照类型可以分为三种类型:双柱,有部分重合,单柱。只有单柱一般存在于双腿完全交叉或者一条腿在视场范围以外的情形,这种情况仅为特例。主要研究如何在双柱型和部分重合型情况下求出双腿的索引号。双柱及有部分重合型求和图,如图 4 所示。



(a)双柱型 (b)部分重合
图 4 双柱型与部分重合示意图
Fig.4 The Overlapped Sketch Map of Double Column Type and Some Part

逐行扫描法为 X,Y 双向扫描的方法。由于求和图已经经过归一化,所以阈值范围为 $\omega \in (0,1)$ 。

双方向扫描方法如下:

(1)取初始阈值 $\omega_0=0.1$,降低噪声;

(2)X 轴从左至右扫描,求出求和图轮廓与阈值线交叉处的索引号。若求和图轮廓在索引号 i 处与阈值线交叉,则 $(D_{i-1}^{\omega}-\omega_j)$ $(D_i^{\omega}-\omega_j)<0$;

(3)若求和图轮廓与阈值线交叉次数大于等于 3 次,则表示当前阈值 ω_j 合适,可以把双腿分开。令 index1,index2,index3 一次等于 2 中求出的索引号。若存在 4 次交叉,则 index4 为第四次交叉处的索引号,否则 index4 等于 $640/\Delta l$ 。Index1,index2,index3,index4 分别表示左右腿的左右两个边界处的索引号。则左右腿索引号分别为:

indexLeft=(index1+index2)/2
indexRight=(index3+index4)/2

(2)

(4)若求和图轮廓与阈值线交叉次数小于 3 次,则表示当前阈值 ω_j 过小。进行沿 Y 方向扫描。取 $\omega_{j+1}=\omega_j+\Delta\omega$ (其中 $\Delta\omega$ 为 Y 方向扫描间隔),重复(2~4)步,直到求和图轮廓与阈值线交叉次数大于等于 3 次,求出左右腿索引号。若时仍无法得到 3 次以上交叉,则表示此时双腿前后重合或者一条腿在视场范围以外。

4.3 人姿态识别

得到人双腿索引号,即识别双腿之后,需要求出人的姿态位置。Kinect 参考系与机器人参考系,如图 5 所示。 Σ' 表示 Kinect 传感器的固有坐标系, Σ 表示机器人坐标系。得到人双腿索引号后,可以求出人双腿的 X',Y',Z' 坐标值,即人双腿在 Kinect 坐标系 Σ 中的坐标 P_{left},P_{right} ,通过坐标变换可以求出人双腿在机器人坐标系中的坐标,两点中垂线表示人的朝向,中点表示人的重心。这样就可以得到人在机器人坐标系下的姿态。

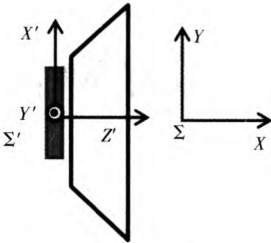


图 5 Kinect 与机器人坐标系
Fig.5 Kinect and Robot Coordinate Frames

5 实验

主要对逐行扫描双腿识别算法进行实验研究。

交际舞中虽然有多种舞步,但是基本步态主要为向前/后迈步、侧跨两种类型。所以实验中测量向前/后迈步、侧跨两种步态。

5.1 向前/后迈步实验

实验中,测试者站在距离 Kinect 传感器 1100mm 的位置,右脚从 800mm 处移动到 1500mm 处,每隔 100mm 进行测量。右脚位置测量值实际值比较结果,如图 6 所示。从图 6 中可以看到测量值在近距离(800~1000)mm 处误差较大。所以推荐最佳使用距离为(1~1.5)m。

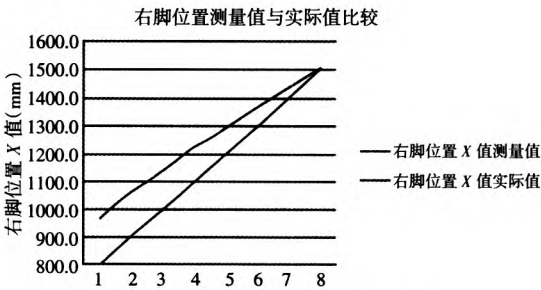


图 6 右脚位置测量值与实际值比较
Fig 6 Comparison Between Measurement Value and Actual Value for Right Leg Position

由于该算法主要使用在伴舞机器人中,所以我们更加关心脚步位移。实验中测量右脚从 800mm 处向后迈了 5 个 100mm 小步移动到 1300mm 处。测得位移值,如表 1 所示。因为伴舞机器人这类人机协作情况中,对精度要求不高,误差在(4~5)cm 以内均满足要求,所以平均值为 80.3mm,误差为 19.7mm,标准差为 15.0mm 满足伴舞机器人要求。

表 1 右脚前后位移
Tab.1 Right Leg Displacement Along Front and Back

	1	2	3	4	5
右脚位移/mm	97.8	75.9	91.3	59.3	77.1
平均值/mm	80.3				
标准差/mm	15.0				

5.2 侧跨实验

实验中,测试者站在 Kinect 传感器正前方 1100mm 处,测试者右脚依次右侧跨 100mm,共 5 次。实验结果,如图 2 所示。平均值 70.0mm,误差 30.0mm,满足伴舞机器人要求。(下转第 7 页)

5 结论

对翼身融合布局增压舱进行了结构设计研究,针对圆柱形多舱室机身空间利用率低结构不连续的特点,在多舱室机身概念的基础上提出了两种有效的增压舱结构型式,并对三种结构进行初步结构应力分析,从空间利用率、布置灵活性、结构效率等方面给出了比较结果,为翼身融合机身的设计提供了重要的参考。

参考文献

[1] Liebeck R. Design of the blended-wing-body subsonic transport[C].40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit,2002:14-17.

[2] George M. Buch Jr., BS .AMC'S NEXT STRATEGIC AIRLIFTER: THE BLENDED WING BODY.[D],2010(6).

[3] Morris A.The mob pmject[R].Report Submitted to the 2003 EC Descartes Prize commission,2003.

[4] Krosse N.Challenges and potential of BWB configuration (results of the project VELA—Very Large Aircraft)[R].Fifth Community Aeronautical Days, 2006.

[5] Daniel Thompson, Joshuo Feys, Michael Filewich, Sharif Abdel-Magid, Dennis Dalli, Fumitaka Goto. The Design and Construction of a Blended Wing Body UAV. the American Institute of Aeronautics and Astronautics AIAA 2011-841.

[6] Mukhopadhyay, V., Sobieszczanski-Sobieski, J.,Kosaka, I, Quinn, G, and Vanderplaats, G, Analysis, Design and Optimization of Noncylindrical Fuselage for Blended -Wing -Body Vehicle, Journal of Aircraft, 2004,41(4):925-930.

[7] Mukhopadhyay V. Blended -wing -body fuselage structural design for weight reduction[R].AIAA Paper, 2005:2349.

[8] Mukhopadhyay V. Structural concepts study of non -circular fuselage configurations [C].AIAA SAE WAC-67 World Aviation Congress,1996: 22-24.

[9] 张永杰,成志远.BWB 民机非圆形增压座舱结构设计研究[J].应用力学学报,2010(6).

(Zhang Yong -jie, Cheng Zhi -yuan. BWB commercial noncircular pressurized cockpit design research [J]. Journal of Applied Mechanics, 2010(6).)

[10] 张秀兰,高路.压力容器封头及接管的设计与计算[J].机械设计与制造,2009(7).

(Zhang Xiu-lan, Gao Lu. The design and calculation of pressure vessel head and bushing[J]. Mechanical Design and Manufacture, 2009(7).)

[11] F. J. J. M. M. Geuskens, O. K. Bergsma, S. Koussios, and A. Beukers. Analysis of Conformable Pressure Vessels:Introducing the Multibubble. AIAA JOURNAL,2011,49(8).

(上接第 3 页)

表 2 右脚左右位移
Tab.2 Right Leg Displacement Along Right and Left

	1	2	3	4	5
右脚位移/mm	65.3	46.9	91.2	74.6	72.2
平均值/mm	70.0				
标准差/mm	16.1				

6 结论

开发了一款基于 Kinect 的轮式主动式伴舞机器人,可以为 人-机器人协作研究的良好平台。介绍了全向运动控制算法,并根据全向运动算法限制确定了轮子的角度。提出了基于逐行扫描的人腿姿态识别算法。该方法可以实现实时识别人腿及位置姿态。最后通过实验验证了该算法的识别精度满足机器人要求。

参考文献

[1] A B Zoss, H. Kazerooni, and A Chu. Biomechanical design of the berkeley lower extremity exoskeleton [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2006,11(2):128-138.

[2] K Kosuge, M Sato,and N Kazamura. Mobile robot helper [C]. IEEE International Conference on Robotics & Automation, San Francisco, CA April 24-28, 2000: 583-588.

[3] 刘召,陈恩,小池良典.被动型舞伴机器人结构设计[J].机器人,2009,31(5):410-415.

(Liu Zhao, Chen Ken, XiaoChi liang-dian. Passive partner robot structure design[J]. Robot, 2009, 31(5):410-415.)

[4] Q Cai,J K Aggarwal.Tracking human motion in structured environments using a distributed-camera system [J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999,21(11):1241-1247.

[5] 毛彬彬.基于激光雷达的机器人同时定位与地图创建的研究[J].机械设计与制造,2009(2):197-199.

(Mao Bin-bin. Mobile robot localization and map creation research based on the laser radar [J]. Machinery Design and Manufacture, 2009(2): 197-199.)

[6] 尤波,李楠,沈爱华.基于双目立体视觉技术的轮式机器人位姿测量方法研究[J].机械设计与制造,2011(8):173-175.

(You Bo, Li Nan, Shen Ai-hua. Wheeled robot pose measurement research based on binocular stereo vision measurement method [J].Machinery Design and Manufacture, 2011(8):173-175.)

[7] L A Schwarz, A Mkhitarian, D Mateus, N Navab. Human skeleton tracking from depth data using geodesic distances and optical flow[J]. Image and Vision Computing, 2012,30(3):217-226.

[8] S Mehrotra, Z Y Zhang, Q Cai, C Zhang, P A.Chou. Low-complexity, near-lossless coding of depth maps from kinect-like depth cameras[C]. IEEE International Workshop on Multimedia Signal Processing (MMSP), 2011,10(17-19):1-6.

[9] R Z Hu, A Hartfiel, J Tung, A Fakih, J Hoey,P Poupart.3D pose tracking of walker users'lower limb with a structured-light camera on a moving platform[C]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops.Colorado,2011,6(20-25):29-36.

作者：[罗瑞琨](#)，[魏有毅](#)，[尹华彬](#)，[徐静](#)，[刘召](#)，[刘峰](#)，[陈恳](#)，[LUO Rui-kun](#)，[WEI You-yi](#)，[YIN Hua-bin](#)，[XU Jing](#)，[LIU Zhao](#)，[LIU Feng](#)，[CHEN Ken](#)

作者单位：[罗瑞琨, 徐静, 陈恳, LUO Rui-kun, XU Jing, CHEN Ken\(清华大学 摩擦学国家重点实验室, 北京 100084; 清华大学机械工程系, 北京 100084\)](#)，[魏有毅, 刘召, 刘峰, WEI You-yi, LIU Zhao, LIU Feng\(清华大学机械工程系, 北京, 100084\)](#)，[尹华彬, YIN Hua-bin\(成都飞机工业\(集团\)有限责任公司制造工程部, 四川成都, 610092\)](#)

刊名：[机械设计与制造](#)[ISTIC](#)[PKU](#)

英文刊名：[Machinery Design & Manufacture](#)

年，卷(期)：2013(6)

参考文献(9条)

1. [A B Zoss;H.Kazerooni;A Chu Biomechanical design of the berkeley lower extremity exoskeleton](#) 2006(02)

2. [K Kosuge;M Sato;N Kazamura Mobile robot helper](#) 2000

3. [刘召;陈恳;小池良典 被动型舞伴机器人结构设计\[期刊论文\]-机器人](#) 2009(05)

4. [Q Cai;J K Aggarwal Tracking human motion in structured environments using a distributed-camera system](#) 1999(11)

5. [毛彬彬 基于激光雷达的移动机器人同时定位与地图创建的研究\[期刊论文\]-机械设计与制造](#) 2009(02)

6. [尤波;李楠;沈爱华 基于双目立体视觉技术的轮式机器人位姿测量方法研究\[期刊论文\]-机械设计与制造](#) 2011(08)

7. [L A Schwarz;A Mkhitarian;D Mateus;N Navab Human skeleton tracking from depth data using geodesic distances and optical flow](#) 2012(03)

8. [S Mehrotra;Z Y Zhang;Q Cai;C Zhang, P A.Chou Low-complexity, near-lossless coding of depth maps from kinect-like depth cameras](#) 2011

9. [R Z Hu;A Hartfiel;J Tung;A Fakih, J Heey, P Poupart 3D pose tracking of walker users' lower limb with a structured-light camera on a moving plattform](#) 2011

本文链接：http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_jxsjyzz201306001.aspx