

仿人机器人上基于无标定手眼协调的人机交互

项祯祯, 苏剑波, 马哲

上海交通大学自动化系, 上海 200240

E-mail: zzzxiang.sjtu@gmail.com

摘要: 在人机交互领域, 机器人的手眼协调能力是机器人与人进行自然交互的重要基础. 如何将手眼协调能力赋予仿人机器人, 是本文研究的主要内容. 本文从无标定手眼协调策略的角度出发对上述问题进行了研究. 针对仿人机器人所具有的本质不确定性和不稳定性的特点, 应用了基于Kalman滤波在线辨识图像雅可比矩阵的方法, 为仿人机器人设计了无标定手眼协调控制器. 仿真研究表明了算法的有效性和对图像观测噪声的鲁棒性. 在仿人机器人上的人机交互实验则进一步说明了本文算法的实际应用价值.

关键词: 仿人机器人, 无标定, 手眼协调, 人机交互, NAO

Uncalibrated Hand-Eye Coordination Based HRI on Humanoid Robot

XIANG Zhenzhen, SU Jianbo, MA Zhe

Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, P. R. China

E-mail: zzzxiang.sjtu@gmail.com

Abstract: In the field of human-robot interaction (HRI), the robot's hand-eye coordination ability is an important basis for the robot to achieve a natural interaction with human being. How to endow a humanoid robot with hand-eye coordination ability is the main content of this paper. In this paper, the issue is studied from the perspective of uncalibrated hand-eye coordination. Since humanoid robot has the nature of uncertainty and instability, the method of Kalman filter based online identification of image Jacobian matrix is applied, and an uncalibrated hand-eye coordination controller is designed for humanoid robot. Simulation shows the effectiveness of the method as well as its robustness to image observation noise. The HRI experiments on the humanoid robot NAO further illustrate the practical application value of the method.

Key Words: Humanoid robot, Uncalibrated, Hand-eye coordination, HRI, NAO

1 引言

人机交互作为机器人领域一个重要的研究方向, 旨在研究如何去理解、设计和评价一个与人进行互动或协作的机器人系统^[1]. 近些年来, 伴随着机器人及其相关技术的发展, 越来越多的关注开始聚焦在如何提升机器人与人进行交互的能力, 使机器人能够以更自然的方式协助人完成相应的任务. 在人机交互过程中, 机器人所需具备的一项重要能力, 就是根据视觉信息引导自身的行为动作, 特别是末端执行器的动作, 完成相应的任务, 即机器人的手眼协调能力^[2]. 因此, 如何提升机器人在人机交互过程中的手眼协调能力, 是科研人员关注和研究的重要问题.

实现机器人手眼协调的方法多种多样, 可大致划分为两种基本策略: (1) 基于已知手眼关系的有标定方法; (2) 基于完全未知手眼关系的无标定方法. 其中, 基于无标定的手眼协调控制策略无需手眼关系的先验信息, 而是在系统的控制过程中在线估计出当前时刻手眼关系的准确模型, 具有鲁棒、灵活、对环境适应能力强等特点, 受到了广泛的关注和研究^[2].

虽然目前对无标定手眼协调的研究取得了很大的进展, 相当一部分工作都具有很好的实验和应用效果^[3-11], 但其中绝大多数的工作都是以工业机械臂作为被控对象进行实验, 仿人机器人所具备的特性与工业机械臂相比, 有着非常显著的差异. 众所周知, 工业

机械臂是面向工业应用环境进行设计和制造的, 具备非常优异的精确性和稳定性, 作为实验中的被控对象是非常理想的. 但对于仿人机器人来说, 情况则有很大的不同. 一方面, 仿人机器人的精度和可靠性与工业机械臂相差甚远, 有着本质的模型不确定性; 另一方面, 仿人机器人又是一个拥有较多自由度的被控对象, 其自由度的数目远远超过工业机械臂, 因而在运动过程或与人交互的过程中很容易发生晃动和振动等不可预期的状况, 有着本质的运动不稳定性. 上述两个方面的原因会直接导致在手眼协调系统的图像处理 and 特征提取环节产生不可忽视的噪声干扰, 若不加以抑制, 则会严重影响手眼协调系统的性能效果, 极端情况下甚至会导致整个控制系统的发散, 使原定的任务无法顺利完成.

基于以上对仿人机器人的本质特点及其对手眼协调系统影响的分析, 可以发现: 仿人机器人的不确定性和不稳定性最终均会直接反映到图像的观测噪声上. 因此, 如何处理好图像特征提取环节的噪声问题, 将会是影响仿人机器人手眼协调能力的关键因素. 考虑到Kalman滤波器对系统的观测噪声有着相当好的鲁棒性, 在实际场景中有着广泛而成功的应用, 本文即从这一角度出发, 应用Kalman滤波算法对描述手眼关系的图像雅可比矩阵进行在线辨识, 使得辨识得到的手眼关系能够适应仿人机器人的特性, 并对人机交互过程中受到的噪声干扰具备一定的鲁棒性. 利用上述得到的对手眼关系的估计, 可设计相应的无标定手眼协调

此项工作得到国家自然科学基金资助, 项目批准号: 61221003.

控制器,进而整合到仿人机器人的控制系统中,完成人机交互过程中的手眼协调任务。

本文第2部分描述了无标定手眼协调系统中用以表示手眼关系的图像雅可比矩阵模型,并详细介绍了如何基于Kalman滤波实现对上述模型的在线辨识;第3部分介绍了无标定手眼协调控制器的设计方法;第4部分介绍了无标定手眼协调系统的仿真研究结果;第5部分展示了在仿人机器人NAO上完成的人机交互实验结果;最后一部分为对文章的总结及对未来工作的展望。

2 图像雅可比矩阵模型及其基于Kalman滤波的在线辨识

2.1 图像雅可比矩阵模型

目前在机器人的无标定手眼协调研究领域,应用得最为广泛的一类方法就是基于图像雅可比矩阵的方法。在这一类方法中,机器人手眼之间的映射关系由图像雅可比矩阵(image Jacobian matrix)模型来描述^[12],其基本定义如下:

$$\dot{\mathbf{f}} = \mathbf{J}(\mathbf{r}) \cdot \dot{\mathbf{r}}. \quad (1)$$

其中, $\mathbf{f} \in \mathbf{R}^m$ 为图像特征向量, $\mathbf{r} \in \mathbf{R}^n$ 为机器人末端执行器在任务空间中坐标向量, $\mathbf{J}(\mathbf{r}) \in \mathbf{R}^{m \times n}$ 即为图像雅可比矩阵,定义为:

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}) = \left(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{r}} \right) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1(\mathbf{r})}{\partial r_1} & \cdots & \frac{\partial f_1(\mathbf{r})}{\partial r_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m(\mathbf{r})}{\partial r_1} & \cdots & \frac{\partial f_m(\mathbf{r})}{\partial r_n} \end{pmatrix}_{m \times n}. \quad (2)$$

图像雅可比矩阵反映了机器人运动空间到图像特征空间的微分映射关系。基于该模型,可以设计各种基于图像的手眼协调反馈控制器,并完成相应的手眼协调任务。

2.2 基于Kalman滤波的图像雅可比矩阵在线辨识

如果将图像雅可比矩阵中的参数转化为一个线性系统的状态,那么通过应用Kalman滤波算法来估计得到该系统的状态,实际上也就完成了对图像雅可比矩阵的辨识工作。该策略实际上是将描述手眼关系的静态非线性模型(即图像雅可比矩阵)转化为一个线性时变的系统状态。

图像雅可比矩阵的离散形式为:

$$\mathbf{f}(k+1) \approx \mathbf{f}(k) + \mathbf{J}(\mathbf{r}(k)) \cdot \Delta \mathbf{r}(k). \quad (3)$$

为了能够将雅可比矩阵中的元素转化为一个线性系统的状态,以便对其进行在线估计,可以定义一个线性系统,其具有如下的 $mn \times 1$ 维状态向量:

$$\mathbf{x} = \left(\frac{\partial f_1}{\partial \mathbf{r}} \quad \frac{\partial f_2}{\partial \mathbf{r}} \quad \cdots \quad \frac{\partial f_m}{\partial \mathbf{r}} \right)^T. \quad (4)$$

其中,

$$\frac{\partial f_i}{\partial \mathbf{r}} = \left(\frac{\partial f_i}{\partial r_1} \quad \frac{\partial f_i}{\partial r_2} \quad \cdots \quad \frac{\partial f_i}{\partial r_n} \right)^T \quad (5)$$

为雅可比矩阵 $\mathbf{J}(\mathbf{r})$ 的第 i 行向量的转置。

此外,将系统的输出定义为由机器人末端执行器运动所引起的图像特征变化,即

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{f}(k+1) - \mathbf{f}(k). \quad (6)$$

综合式(3)和(6),可得到如下的系统状态空间描述:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{x}(k) + \boldsymbol{\eta}(k), \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k). \end{cases} \quad (7)$$

其中, $\boldsymbol{\eta}(k)$ 和 $\mathbf{v}(k)$ 分别为上述线性系统的状态噪声和观测噪声,假定二者均为高斯白噪声; $\mathbf{C}(k)$ 为系统的输出矩阵,定义为:

$$\mathbf{C}(k) = \begin{pmatrix} \Delta \mathbf{r}(k)^T & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \Delta \mathbf{r}(k)^T \end{pmatrix}_{m \times mn}. \quad (8)$$

在得到了系统的状态方程后,可由Kalman滤波算法^[13]对该系统的状态进行估计:

$$\begin{cases} \mathbf{Q}(k+1) = \mathbf{P}(k) + \mathbf{R}_\eta, \\ \mathbf{K}(k+1) = \mathbf{Q}(k+1)\mathbf{C}^T(k) \times \\ \quad [\mathbf{C}(k)\mathbf{Q}(k+1)\mathbf{C}^T(k) + \mathbf{R}_v]^{-1}, \\ \mathbf{P}(k+1) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k+1)\mathbf{C}(k)]\mathbf{Q}(k+1), \\ \hat{\mathbf{x}}(k+1) = \hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{K}(k+1) \times \\ \quad [\mathbf{y}(k+1) - \mathbf{C}(k)\hat{\mathbf{x}}(k)]. \end{cases} \quad (9)$$

其中, \mathbf{R}_η 和 \mathbf{R}_v 为系统噪声方差阵,根据实际的噪声情况进行设定; $\mathbf{P}(k)$ 为先验误差的方差阵。系统状态的初值 $\hat{\mathbf{x}}(0)$, 也即初始工作点所对应的雅可比矩阵初值 $\hat{\mathbf{J}}(k+1)$, 则可通过如下的最小二乘方法获得:

- 1) 在机器人末端执行器的初始工作点,手动给定控制量,使机器人做 n 步线性无关的试探运动 $\Delta \mathbf{r}_1, \dots, \Delta \mathbf{r}_n$, 同时在图像空间记录下由上述试探运动所引起的图像特征变化 $\Delta \mathbf{f}_1, \dots, \Delta \mathbf{f}_n$;
- 2) 根据雅可比矩阵的定义,可以得到雅可比矩阵的初始估计值:

$$\hat{\mathbf{J}}(0) = (\Delta \mathbf{f}_1, \dots, \Delta \mathbf{f}_n)(\Delta \mathbf{r}_1, \dots, \Delta \mathbf{r}_n)^{-1}; \quad (10)$$

- 3) 按照前述的变换方法用 $\hat{\mathbf{J}}(0)$ 构造 $\hat{\mathbf{x}}(0)$, 即可得到系统的初始状态。

通过对上述系统进行估计,便可以得到 k 时刻图像雅可比矩阵的估计值,从而应用于无标定手眼协调控制器的设计。

3 无标定手眼协调控制器设计

定义机器人的三维基坐标系为机器人运动空间, $\mathbf{r}^g = (r_x^g \ r_y^g \ r_z^g)^T$ 为末端执行器在机器人基坐标系中的坐标;图像特征空间定义为末端执行器在固定双目摄像机中的图像位置坐标,即 $\mathbf{f}^g = (f_1^g \ f_2^g \ f_3^g \ f_4^g)^T$ 。根据图像雅可比矩阵的定义式可得:

$$\dot{\mathbf{f}}^g = \mathbf{J}(\mathbf{r}^g) \cdot \dot{\mathbf{r}}^g. \quad (11)$$

将上式离散化后可得:

$$\mathbf{f}^g(k+1) \approx \mathbf{f}^g(k) + \mathbf{J}(k) \cdot \Delta \mathbf{r}^g(k). \quad (12)$$

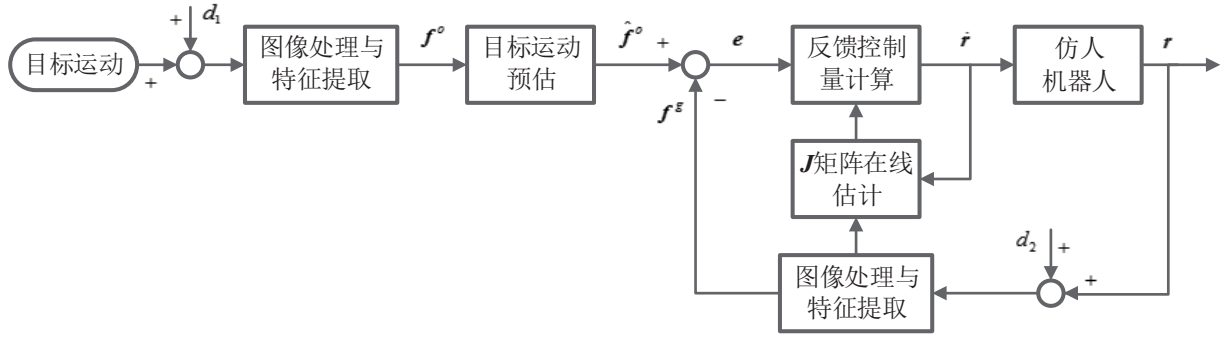


图 1: 无标定手眼协调控制系统框图

根据上一节的描述, 可以构造以图像雅可比矩阵为系统状态的线性系统, 再由Kalman滤波算法可以得到图像雅可比矩阵在 k 时刻的估计值 $\hat{J}(k)$. 从而由式(12)可得 k 时刻的最优控制量为:

$$\mathbf{u}(k) = \Delta \mathbf{r}^g(k) = \hat{\mathbf{J}}(k)^+ (\hat{\mathbf{f}}^o(k+1) - \mathbf{f}^g(k)). \quad (13)$$

其中, $\hat{\mathbf{J}}(k)^+$ 为雅可比矩阵 $\hat{\mathbf{J}}(k)$ 的广义逆矩阵, $\hat{\mathbf{f}}^o(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻对目标图像特征的估计, 可通过如下式所示的一阶预估获得:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{f}}^o(k+1) &= \mathbf{f}^o(k) + (\mathbf{f}^o(k) - \mathbf{f}^o(k-1)) \\ &= 2\mathbf{f}^o(k) - \mathbf{f}^o(k-1). \end{aligned} \quad (14)$$

为简化控制量的描述, 定义系统的图像特征偏差 $\mathbf{f}^o(k)$ 为:

$$\mathbf{e}^o(k) = \hat{\mathbf{f}}^o(k+1) - \mathbf{f}^g(k). \quad (15)$$

同时, 为保证控制量不会超出机器人的最大运动能力, 将控制量修正为:

$$\mathbf{u}(k) = \mu_k \cdot \hat{\mathbf{J}}(k)^+ \cdot \mathbf{e}(k). \quad (16)$$

其中, μ_k 为修正系数, 定义为:

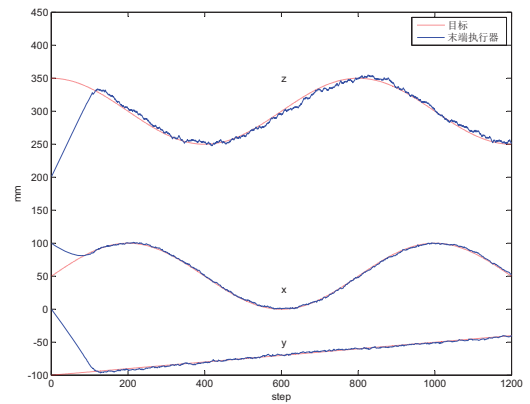
$$\mu_k = \min \left(\frac{\|\Delta \mathbf{r}_{\max}\|}{\|\hat{\mathbf{J}}(k)^+ \cdot \mathbf{e}(k)\|}, 1 \right). \quad (17)$$

上式中的 $\Delta \mathbf{r}_{\max}$ 对应于机器人末端执行器的最大运动速度.

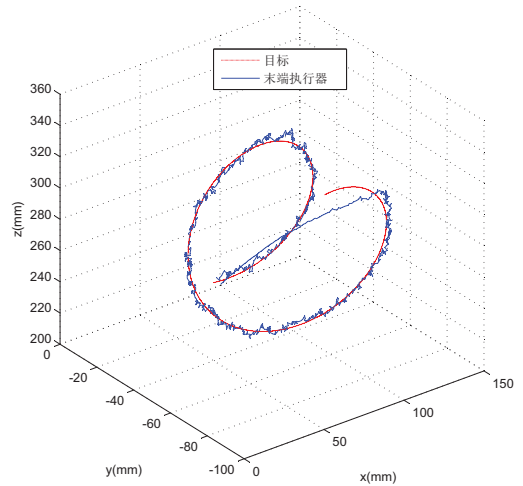
整个无标定手眼协调控制系统的框图如图1所示. 其中, d_1 和 d_2 表示由于仿人机器人动作的不稳定性而引入的图像噪声. 当前时刻的图像雅可比矩阵会根据上一时刻的控制量及机器人末端执行器的位置坐标实时估计得到, 并将与系统的特征偏差一同用于当前时刻控制量的计算.

4 仿真研究

仿真研究的内容为仿人机器人的末端执行器对三维运动目标的跟踪. 在仿真中, 设定目标物体做空间螺



(a) x、y、z方向的跟踪效果



(b) 工作空间中的跟踪效果

图 2: 三维运动目标的跟踪效果曲线

旋线运动, 然后由Kalman滤波实现对图像雅可比矩阵的在线辨识, 并由上一节设计的无标定手眼协调控制器得到相应的控制量, 控制末端执行器跟踪目标物体的运动. 同时, 为了考察系统对图像噪声的鲁棒性, 在目标位置提取环节还施加了最大幅值为 ± 2 个像素、均值为0的随机噪声.

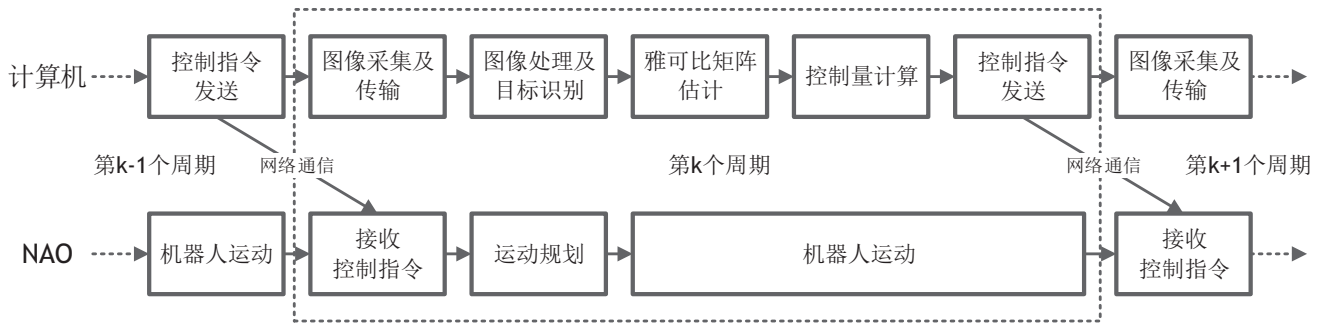


图 4: 手眼协调人机交互系统工作流程图

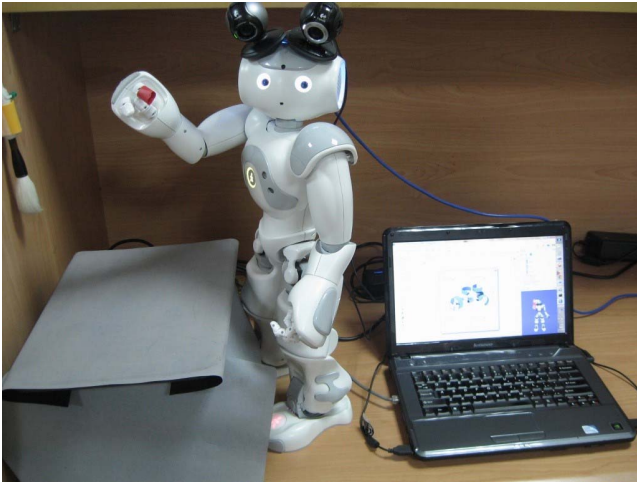


图 3: 手眼协调人机交互系统结构实物图

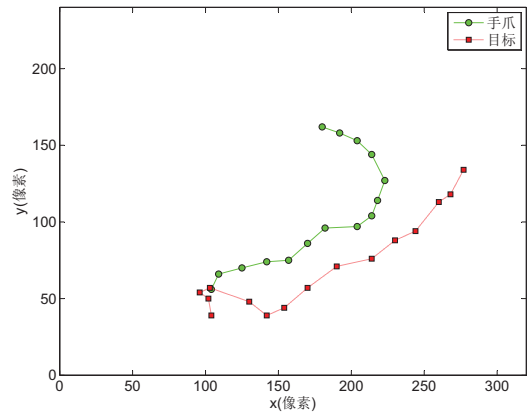
仿真在MATLAB平台上完成, 系统的控制周期为50ms. 仿真结果如图2所示. 可以看到, 机器人的末端执行器在初始时刻的0.5s后即实现了对目标物体的跟踪, 表现出了很好的动态响应性能. 在完成跟踪后, 系统并没有表现出明显的稳态误差, 体现出了手眼协调控制器具备较好的稳态响应性能. 同时, 注意到系统在跟踪z轴方向的运动时波动相对较大, 这是由于z轴方向恰好与摄像头的光轴方向平行, 摄像头对光轴方向上运动的灵敏度与其它两个方向相比要稍差一些.

以上仿真结果表明, 基于Kalman滤波在线辨识图像雅可比矩阵所设计的控制器能够实现对运动目标的迅速跟踪, 同时对图像噪声也有较好的鲁棒性.

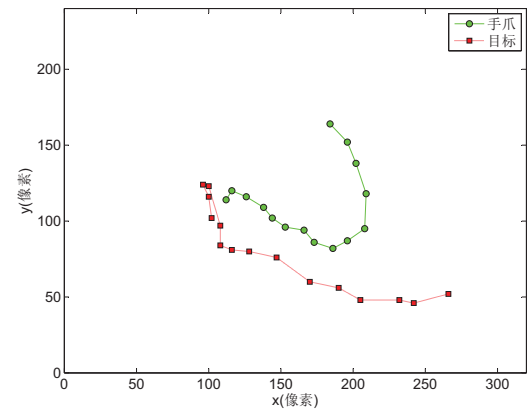
5 仿人机器人上的人机交互实验

基于无标定手眼协调的人机交互实验是在仿人机器人NAO上完成的. 整个手眼协调人机交互系统的结构如图3所示. 其中, 为了构成手眼协调系统所需的双目视觉, 在NAO机器人上安装了两个摄像头, 工作空间的图像信息会通过USB线传至计算机. NAO机器人的控制指令则通过以太网进行传输. 系统的工作流程图如图4所示.

整个人机交互实验分为两个部分. 第一部分是三维运动目标的跟踪实验, NAO机器人的手爪需要在三维空间中跟踪一个运动物体, 目的是验证本文算法在



(a) 左摄像头图像空间



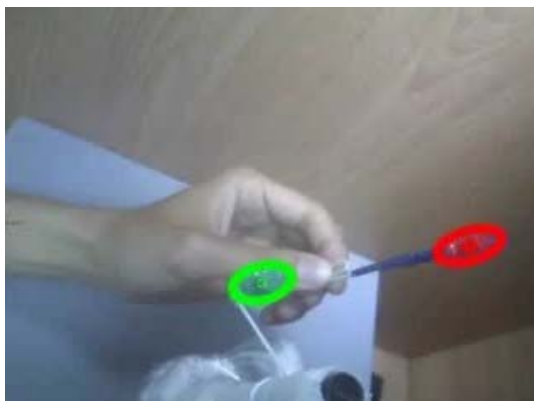
(b) 右摄像头图像空间

图 5: 双目视觉图像空间中手爪的跟踪轨迹

仿人机器人上的可行性和有效性; 第二部分是人与仿人机器人之间递接物品的实验, 工作人员会向NAO机器人传递一支毛笔, 而NAO机器人则需准确接住毛笔, 目的是进一步说明本文方案的实际应用价值.

5.1 三维运动目标跟踪实验

实验中的运动目标做近似直线运动, 速度约为1cm/s, 机器人需要控制手爪跟踪上目标物体的运动. 其中, 为简化图像识别过程, 目标物体与手爪上均标记有一个颜色块. 同时, 为提升目标识别和坐标提取过程对图像噪声的鲁棒性, 目标物体和手爪标记在图像



(a) 开始时



(b) 跟踪中



(c) 完成时

图 6: 三维运动目标的跟踪过程图



(a) 开始时



(b) 接近中



(c) 完成抓取

图 7: 递接毛笔的人机交互实验过程图

平面上的坐标均由CAMShift算法^[14]进行提取。

目标跟踪结果如图5和图6所示。实验结果显示，仿机器人的手爪能够在三维目标运动的过程中准确地完成跟踪任务；同时，实验过程中也发现基于Kalman滤波的无标定手眼协调算法对跟踪过程中的噪声有着很好的鲁棒性，确保了跟踪任务得以顺利完成。需要说明的是，由于实验中是通过提取颜色块的重心位置来确定手爪和目标的位置，而颜色块本身就具有约5个像素的半径，所以当完成跟踪任务时，两者在图像空间中仍有一定的像素差，约为色块半径的两倍，即约10个像素的距离。

5.2 递接物品的人机交互实验

实验中，工作人员手执一支带有标记的毛笔，并将

其递给仿人机器人NAO；NAO机器人则需要根据视觉图像反馈，确定毛笔及其手爪的相对位置，然后由无标定手眼协调控制器控制手爪主动接近并最终完成对毛笔的准确抓取。

实验过程中NAO机器人的手爪向毛笔接近并完成抓取的过程如图7所示。实验结果显示，仿人机器人NAO能够有效地控制手爪的运动，成功抓取到工作人员递过的毛笔。同时，在实验中还可以发现，基于Kalman滤波的无标定手眼协调控制器对运动过程和特征提取环节所产生的图像噪声具有很好的鲁棒性，能够适用于仿人机器人之间进行人机交互的应用场景。

6 结论

人机交互是当前机器人领域的研究热点之一。机器人的手眼协调能力是机器人与人进行自然交互的重要基础。本文针对仿人机器人与人之间基于无标定手眼协调实现人机交互的问题进行了研究。仿人机器人与一般的工业机械臂相比,有着本质的模型不确定性和运动不稳定性,由此会导致在图像处理 and 特征提取环节产生较强的噪声干扰。为了应对上述噪声干扰,本文采用了基于Kalman滤波在线辨识图像雅可比矩阵的方法设计了无标定手眼协调控制器。仿真研究显示了本文所选择方法的有效性和鲁棒性。同时,在仿人机器人NAO上所进行的人机交互实验则更进一步验证了本文算法在人机交互领域的实际应用价值。

下一步研究的重点是面向更复杂和多样的人机交互任务,研究适用于仿人机器人的快速无标定手眼协调方法,以进一步提升仿人机器人与人进行交互的能力。

参考文献

- [1] Goodrich M. A., Schultz A. C., Human-robot interaction: a survey. *Foundations and Trends in Human-Computer Interaction*, 2007, 1(3): 203-275.
- [2] 苏剑波. 机器人无标定手眼协调. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [3] Herve J. Y., Sharma R., Cucka P., Toward robust vision-based control: Hand/eye coordination without calibration. *IEEE International Symposium on Intelligent Control*, 1991: 457-462.
- [4] Yoshimi B. H., Allen P. K., Active, uncalibrated visual servoing. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1994: 156-161.
- [5] Sutanto H., Sharma R., Varma V., Image based autodocking without calibration. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1997, 2: 974-979.
- [6] Qian J., Su J., Online estimation of image Jacobian matrix by Kalman-Bucy filter for uncalibrated stereo vision feed-back. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2002: 562-567.
- [7] Hsu L., Aquino P. L. S., Adaptive visual tracking with uncertain manipulator dynamics and uncalibrated camera. *IEEE Conference on Decision and Control*, 1999, 2: 1248-1253.
- [8] Liu Y. H., Wang H., Wang C., Lam K. K., Uncalibrated visual servoing of robots using a depth-independent interaction matrix. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, 22(4): 804-817.
- [9] Pomares J., Chaumette F., Torres F., Adaptive visual servoing by simultaneous camera calibration. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2007: 2811-2816.
- [10] Hashimoto N., Kubota T., Baeg M., A scheme for visual tracking of robot manipulator using neural network. *IEEE International Joint Conference on Neural Networks*, 1991: 1073-1078.
- [11] 潘且鲁, 苏剑波, 席裕庚. 眼在手上机器人手眼无标定三维视觉跟踪. *自动化学报*, 2002, 28(3): 371-377.
- [12] Weiss L., Sanderson A., Neuman C., Dynamic sensor-based control of robots with visual feedback. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1987, 3(5): 404-417.
- [13] 徐南荣, 宋文忠, 夏安邦. 系统辨识. 南京: 东南大学出版社, 1991.
- [14] Bradski G. R., Computer vision face tracking for use in a perceptual user interface. *Intel Technology Journal*, 1998, 2(2): 1-15.