

一种用于机器人的物体运动参数快速识别方法

苏剑波 李耀通

(中国科学院自动化研究所 北京 100080)

摘 要

为了使机器人能跟踪并抓取运动目标,实时给出目标物的运动参数是首要问题,也是个困难的问题。本文给出一种物体二维运动的快速估计算法,不需要抽取物体特征,也不需要事先知道物体的模型,而是通过运动物体序列图像的复数矩与运动参数之间的关系,来恢复物体的二维运动。该算法与基于傅里叶描述子的运动估计方法进行了比较,证明了算法的快速性和准确性。

关键词: 机器人,视觉跟踪,图像处理。

1、引言

同一物体的序列图像是由景象场中摄像机和物体之间的相对位置变化引起的。分析序列图像间物体的位置变化,再根据物体初始位置和摄像机坐标系之间的标定关系,就可以求出摄像机和物体的相对运动。

从序列图像分析运动一般有两种方法^[1],即基于特征的运动估计^[2,3]和基于光流的运动估计^[4],但均不能满足机器人实时跟踪的要求。

基于特征的估计,是先从图像上抽取一系列能明显区别物体的二维特征,在序列图像间建立起它们的对应匹配关系,再根据刚体运动的假设,即运动前后刚体的两特征点之间的相对距离不变,建立约束关系,得到一系列非线性方程,把观察到的图像特征之间的相对位移代入这些方程,可解出景象场中物体的运动参数。Roach 和 Aggarwal^[2]证明了由两幅图像中五个对应点可以求出与图像点对应的空间坐标,进而求出运动参数,但解非线性方程需要耗时的搜索过程,而且在建立序列图像间特征模式的对应匹配关系时,由于景物间相互关系的复杂性,可能出现以下几种情况: a) 不能确定被观察的特征点在序列图像中是否一直可见; b) 不同特征在特定位置有相同形式; c) 同一特征以不同方式出现于不同图像中等等,致使匹配问题一直没有很好解决,即使特定约束条件下的匹配能够完成,也需要十分可观的耗时。因此,这种方法不能满足机器人实时操作的需要。

基于光流的方法,是从图像上每一个像素点在序列图像间的灰度值变化,并结合已知

的物体运动信息引入的图像光流变化的约束和假设,计算图像平面光流场,以此估计物体运动. Horn 和 Schunck^[5] 引入了光流变化的平滑性约束,用递推方法解出光流场,但不能保证收敛. Nagel^[6] 设计了灰度值角检测器来检测图像中满足某些特定条件的点的位置,从而产生光流的闭环形式解. 但为获取一幅图像的光流场,其计算量是十分巨大的. 同时,在图像上高度纹理区域灰度梯度计算很不精确,且在光流场的不连续区域更不能满足光流平滑性的假设.

为了达到快速简便地估计运动参数的目的,考虑计算序列图像的统计特征来求出运动参数,这样就省去了特征抽取和匹配过程,也不需要引入图像光流变化的各种假设.

以统计方法估计运动,主要工作在于傅里叶描述子^[7,8,4]. 机器人连续运动要求起码有 60—100Hz 的位置输入指令,但即使是快速傅里叶变换仍然不能达到毫秒量级的计算时间. 为了解决这个关键问题,这里提出了一种基于复数矩理论的一类傅里叶变换的算法,来计算平面物体二维运动参数,并与傅里叶描述子方法进行比较. 模拟和仿真表明,所提出的算法可以达到机器人实时操作的要求.

2、算法理论背景

在二维平面上,世界坐标系 $X-O-Y$ 中, t_1 时刻的物点位置为点 $P_1 = (x, y)$, 它在 t_2 时刻运动到点 $P_2 = (x', y')$. 它们之间的运动关系可描述为: P_1 点绕 O 点逆时针旋转 θ 角,再沿 X 方向平移 x_0 ,沿 Y 方向平移 y_0 后到达 P_2 点,则 (x', y') 与 (x, y) 之间有如下关系:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \triangleq R \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + T. \quad (1)$$

令 $f(x, y)$ 表示 t_1 时刻 $P_1 = (x, y)$ 点的灰度值, $f(x', y')$ 表示 t_2 时刻 $P_2 = (x', y')$ 点的灰度值,则在环境光照及物体表面反射率不变的假设条件下,有 $f(x, y) = f(x', y')$ 关系成立. 同时,在不致引起混淆的情况下,又以 $f(x, y)$ 描述 t_1 时刻的图像 F_1 ,以 $f(x', y')$ 描述 t_2 时刻的图像 F_2 ,则用傅里叶变换计算运动,主要是基于如下傅里叶变换对:

$$\begin{aligned} \text{若} & \quad f(x, y) \iff F(u, v) \\ \text{则} & \quad f(x', y') \iff F([u, v]R^t) \exp(j2\pi[u, v]R^t T/N) \end{aligned}$$

其中 R, T 如(1)式定义; N 为图像尺度,可假定图像大小为 $N \times N$; t 表示矩阵转置.

由此看出,单由傅里叶变换求旋转和平移是困难的,因为经傅里叶变换后,它的频谱与幅角均和运动参数有关,无法分离解出. 因此,考虑如下变换:

$$G_n(u, v) = \sum f(x, y)(ux + jvy)^n. \quad (2)$$

其中 \sum 为对图像上所有像素点求和, n 为变换阶次, $j = \sqrt{-1}$ 为虚数单位. 这个变换实际上是平面 $X-O-Y$ 到复平面 $U-jV$ 的映射,每一个 $X-Y$ 平面的图像均有 n 个 $U-jV$ 平面的变换图像与其对应.

对时序相邻的两幅二值(在环境光照及物体表面光反射率不变时,用于图像二值化的灰度阈值可事先选定)图像 F_1 和 F_2 , 计算上述变换到二阶:

$$\text{对 } F_1: \quad G_1(u, v) = \sum f(x, y)(ux + jvy), \quad (3a)$$

$$G_2(u, v) = \sum f(x, y)(ux + jvy)^2, \quad (3b)$$

$$\text{对 } F_2: \quad G'_1(u, v) = \sum f(x', y')(ux' + jvy'), \quad (3c)$$

$$G'_2(u, v) = \sum f(x', y')(ux' + jvy')^2. \quad (3d)$$

为简单起见,取 $U - jV$ 平面上点(1,1)处的变换值来推导运动参数计算公式。假设变换值 $G_1(1,1)$, $G_2(1,1)$, $G'_1(1,1)$ 和 $G'_2(1,1)$ 已经求出,并令 $f_{11} = G_1(1,1)$, $f_{12} = G'_1(1,1)$, $f_{21} = G_2(1,1)$, $f_{22} = G'_2(1,1)$,则由(1)式得

$$x + jy = e^{-i\theta}[(x' + jy') - (x_0 + jy_0)]. \quad (4)$$

将(4)式代入(3c),(3d)式,并利用(3a),(3b)式得

$$x_0 + jy_0 = \frac{f_{11}(sf_{22} - f_{12}^2) \pm f_{12} \sqrt{(f_{11}^2 - sf_{21})(f_{12}^2 - sf_{22})}}{s(sf_{22} - f_{12}^2)}, \quad (5)$$

$$\theta = \arg(f_{11} - s(x_0 + jy_0)) - \arg(f_{12}). \quad (6)$$

其中 $s \triangleq \sum f(x, y)$ 为图像上以像素数为单位的运动物体面积,且认为它保持不变。这样,就可得到用于直接解析求出平面运动参数的公式。

观察(2)式看出,对于二值图像景象场中只有运动物体,则对整幅图像进行由(2)式定义的计算,只要把图像中灰度值按其坐标值加权就完成变换,因此计算过程相当简捷明了。这也正是计算时间能大为减少而达到实时操作目的的根本所在。

从理论上说,由相邻两幅图像的 $G_n(1,1)$ 值就能计算出运动物体的运动参数。但为取得更精确的运动估计,可选取多个 u, v 值计算 $G_n(u, v)$, 取它们的最小二乘解获取运动参数。这个过程不需要特征抽取和匹配。事实上,它根本不考虑运动物体的外观形态,即不需要事先知道物体的模型。

3、模拟实验结果

由于摄像机的成像平面与物体运动平面很难校准为相互平行或精确地已知其相互关系,致使实际拍摄的运动物体的图像存在一定的畸变,因此,用计算机模拟产生二值运动图像序列,且图像上只有单个运动物体,以验证上述算法。图1所示为计算机产生的二值图像序列。

其中(a)为时刻 t_1 时的初始物体位置;(b)为时刻 t_2 时的物体位置,相对于 t_1 时物体在 X 方向平移了 10, Y 方向平移了 10(单位:像素数);(c)为时刻 t_3 时的物体位置,相对于 t_2 时刻物体逆时针旋转了 0.1 弧度;(d)为时刻 t_4 时的物体位置,相对于 t_3 时刻物体逆时针旋转了 0.1 弧度,平移了 $x_0 = 10$ (像素), $y_0 = 10$ (像素)。

表1为对应的相对运动估计。由表中结果看出,在只有平移($t_2 - t_1$)的情况下物体运动估计得很准确;在物体运动有旋转($t_3 - t_2$ 和 $t_4 - t_3$)时,由于旋转参数估计的误差,使平移的估计精度也受到影响。表中仿真估计结果的两个解是在(5)式中取正、负号产生的,表示旋转是顺时针方向或逆时针方向。表中还给出了计算时间,可以看出这样数量级的计算时间为机器人实际操作提供了条件。

现将用傅里叶描述子方法计算运动的过程简述如下^[8]:

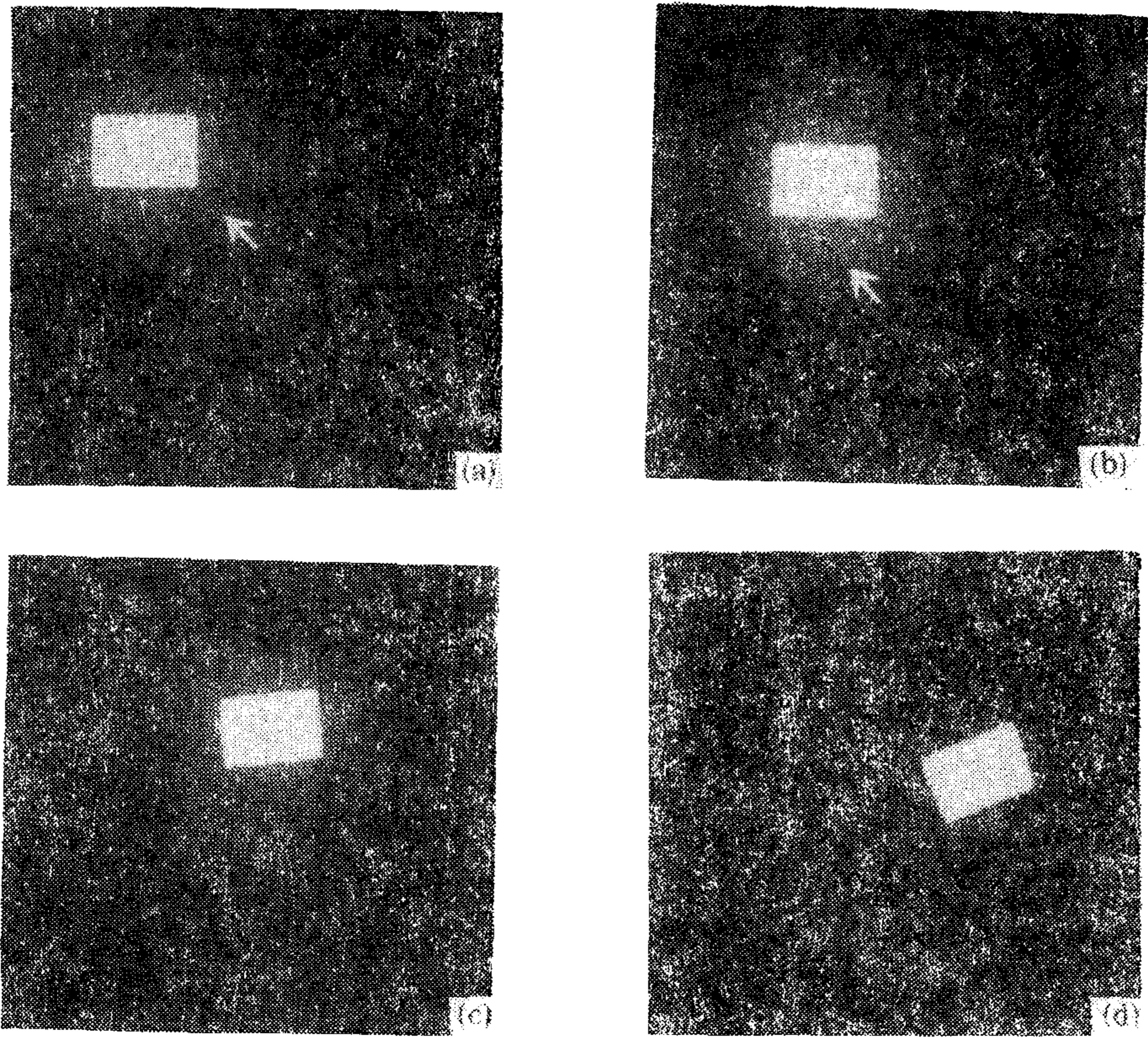


图 1 运动图像序列

a) 找出运动物体的重心.

b) 以重心为原点建立极坐标. 以函数 $\rho(\omega)$ 描述物体边界, ρ 为边界点到原点的距离, ω 为原点与边界点连线与水平轴的夹角. 函数 $\rho(\omega)$ 对物体的平移是不变的, 物体逆时针旋转 ω_0 后, 边界的描述函数为 $\rho(\omega - \omega_0)$.

c) 把 $\rho(\omega)$ 展开成傅里叶级数. 序列图像的 ρ 函数的傅里叶系数与物体相对旋转存在特定关系, 以此求出旋转.

d) 把图像进行傅里叶变换. 序列图像傅里叶变换的幅角差是平移和旋转的函数, 由此可求出平移.

表 1 用本文方法估计运动结果

	x_0	y_0	θ	t
$t_2 - t_1$	10	10	0	0.28
	432	410	3.141593	
$t_3 - t_2$	0.5756	-0.9126	0.103899	0.35
	378.6801	440.5391	3.245491	
$t_4 - t_3$	10.5855	9.0974	0.103899	0.32
	388.6901	450.5491	3.245491	

表 2 用傅里叶描述子法估计运动结果

	x_0	y_0	θ	t
t_2-t_1	10	10	0	9.83
t_3-t_2	0.4455	-0.5491	0.103708	9.89
t_4-t_3	11.4790	8.3869	0.103107	9.99

注: 表中 x_0, y_0 的单位均为像素数; θ 的单位为弧度; t 的单位为秒。

由上述过程计算旋转和平移的结果如表 2 所示, 物体图像序列仍如图 1 所示。

比较表 1 和表 2 的结果, 可以看出用两种方法计算运动参数时, 基于复矩理论方法比基于傅里叶描述子方法的估计精度更高一些; 在计算时间的比较上, 作者在 VAX-785 上做上述仿真实验, 基于复矩理论方法估计两幅 512×512 大小的图像间的物体的运动耗时约 300 毫秒; 而每进行这样一幅图像的傅里叶变换需 10 分钟左右。(表 2 中所列计算时间是指只计算一个傅里叶变换值估计运动时的耗时)

4. 结束语

本文提出的基于复矩理论估计运动参数的方法, 不需要特征抽取和解非线性方程. 通过对平面物体的二维运动估计进行的推导和仿真, 及把它与傅里叶描述子方法进行比较, 证明了本文提出的复矩方法为实现机器人对运动物体的实时跟踪提供了可能。

当然, 由于摄像机坐标系标定难以精确、摄像机本身参数的偏差及物体成像的畸变, 等等, 影响了本算法估计运动参数的精度. 同时, 以这种算法完成的一个视觉周期仍为机器人控制周期的若干倍, 因此, 需要对物体运动轨迹进行预报, 以驱动机器人朝预报位置移动, 而预报轨迹与实际轨迹在一般情况下总会有误差, 所以这样的机器人跟踪定位系统误差较大. 但这种方法可以在目前计算机硬件资源条件下完全由软件实现, 且对所跟踪的目标没有模型要求, 在精度要求不太高的场合也能满意地操作. 因此, 它的应用是现实的。

参 考 文 献

- [1] Aggarwal J K, Nandhakumar N. On the Computation of Motion from Sequence of Images—A Review. *Proc. of IEEE*, 1988, **76**(8): 917—935.
- [2] Roach JW, Aggarwal JK. Determining the Movement of Objects from a Sequence of Images, *IEEE Trans. Pattern Analy. Machine Intell.*, PAMI-2, 1980, (6): 554—562.
- [3] Tsai RY, Huang TS. Uniqueness and Estimation of Three Dimensional Motion Parameters of Rigid Objects with Curved Surface. *IEEE Trans. PAMI*, 1984, **6**(1): 13—26.
- [4] Huang TS, Tsai RY. Image Sequence Analysis: Motion Estimation, in *Image Sequence Processing and Dynamic Scene Analysis*. Springer-Verlag New York, New York, 1981.
- [5] Horn BHP, Schunck BG. Determining Optical Flow. *Artificial Intelligence*, 1981, **17**(1): 185—203.
- [6] Nagel HH. Displacement Vectors Derived from Second Order Intensity Variations in Image Sequences. *Comput. Vision, Graph. Image Processing*, 1983, **21**(1): 85—117.
- [7] Lin, Z. C., et al, Motion Estimation from 3-D Points Sets with and without Correspondence. *Proc. of Comput. Vision Pattern Recog.*, 1986: 194—201,
- [8] Ganthier JP et al. Motion and Pattern Analysis: Harmonic Analysis on Motion Groups and Their Homogeneous Spaces. *IEEE Trans. Sys. Man Cyber.*, 1991, SMC-21(1): 159—172.

A FAST PARAMETER ESTIMATION ALGORITHM OF MOVING OBJECTS FROM SEQUENTIAL IMAGES FOR ROBOT TRACKING

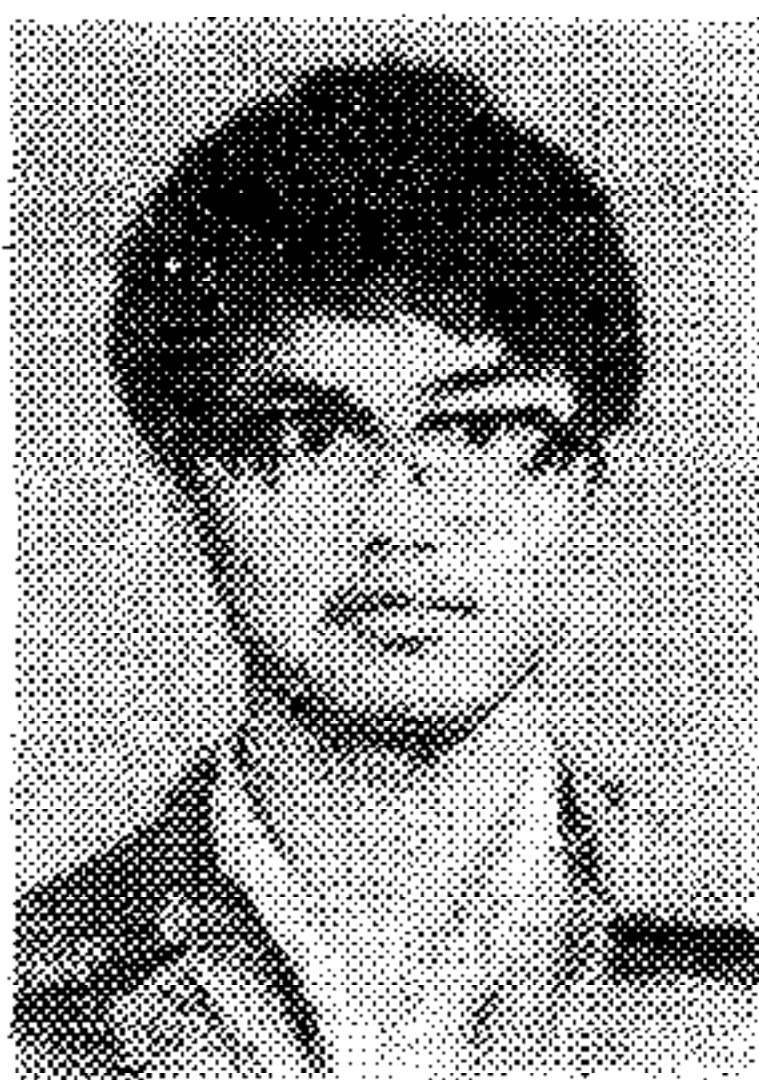
SU JIANBO LI YAOTONG

(*Institute of Automation, Academy of Sciences, Beijing 100080*)

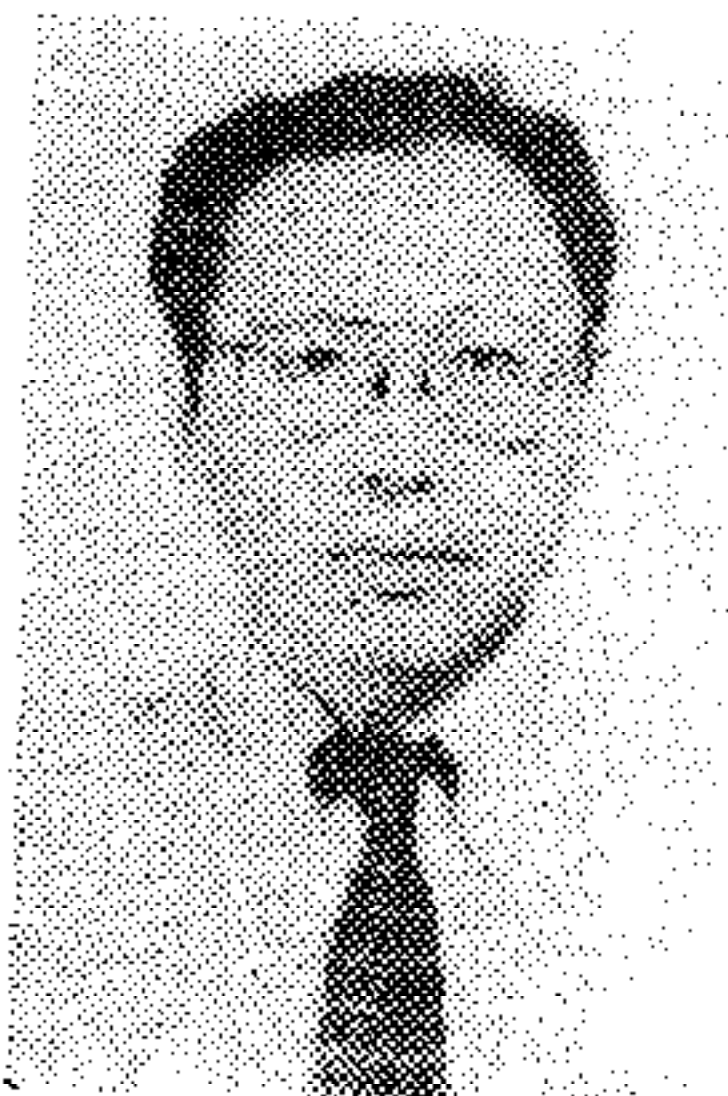
ABSTRACT

It is essential to estimate in real-time the parameters of motion of moving objects in visually guided robot tracking and grasping. While feasibility of the task has been demonstrated in laboratories by using for instance optical flow method at the expense of special hardware implementation, dedicated and efficient algorithms are still considered essential and studied as an open research problem. This paper presents a fast parameter estimation algorithm of moving objects in 2-D space, based on our finding of the relationship between the desired parameters of motion and a complex transformation on the images. This algorithm requires no model of the objects and no feature extraction. Comparison of the performances of this algorithm with those of FFT will be given in the paper.

Key words: robotics; visual tracking; image processing.



苏剑波 1969年生,1985年进入上海交通大学学习,1989年毕业于该校自动控制系,同年考取中国科学院自动化研究所模式识别与智能控制专业硕士研究生,1992年3月毕业。现在东南大学自动化研究所攻读博士学位。研究领域为机器人学。



李耀通 1943年生于北京。1967年清华大学自动控制系毕业,1981年核工业部西南物理研究院硕士。1986年美国威斯康辛大学博士。现在中国科学院自动化研究所工作,研究员,博士生导师。主要研究领域包括机器人与自动化、复杂系统建模与控制、神经网络、模式识别与控制等。1985年来已发表论文50余篇。中国自动化学会理事,IEEE会员,IFAC发展中国家委员会委员。《自动化学报》副主编。