

二维视觉搜索中成功扫视幅度 中值与视力角

周果宏

(首都医科大学生物医学工程系 北京 100054)

摘要 用二维视觉搜索实验中的成功扫视幅度中值来量度视力角. 通过对成功扫视幅度的计算和分析, 研究了视力角与搜索场景对比度, 及干扰物体密度的关系, 并揭示了扫视眼动是由全局搜索策略和瞬间周边视觉信息的引导所共同控制. 最后用正态分布模型来模拟视力角, 通过选择适当参数, 所给出的函数式能较好地拟合实验数据, 并能反映出场景对比度和干扰物密度之间的互补关系.

关键词 眼动, 扫视, 视觉搜索, 视力角, 成功扫视.

MEDIAN SUCCESSFUL SACCADDE SIZE AND VISUAL LOBE

ZHOU Guohong

(Department of Biomedical Engineering, Capital University of Medical Sciences, Beijing 100054)

Abstract The paper studies visual lobe by measuring and calculating median successful saccade size (MSSS) in 2-D visual search. The experiment results show that MSSS is a function of Michaelson contrast and the clutter density. During scanning a search scene, saccade eye movement is directed by a combination of global covering plan and moment-to-moment adjustments guided by useful peripheral information. At last, a Gaussian model is given to fit the experiment data. This model captures not only the first order effects of clutter and contrast but also their reciprocal interactions.

Key words Eye movements, saccade, visual search, visual lobe, successful saccade.

1 引言

视觉搜索包含两个交互作用的过程. 第一, 是覆盖搜索范围的过程. 通过眼的扫视运动去覆盖被搜索范围. 第二, 视觉本身又包含一系列复杂过程. 在低级视觉活动中, 高分辨率的视网膜中心凹随着眼动而相继地移向并凝视搜索场景中感兴趣点. 中级视觉活动包

括对运动敏感的周边视网膜活动,还包括立体视觉以及可能的并行预先关注视觉.高级视觉活动包括扫视轨迹理论(Scanpaths)明确阐述的自上而下识别模式的主动观看^[1].

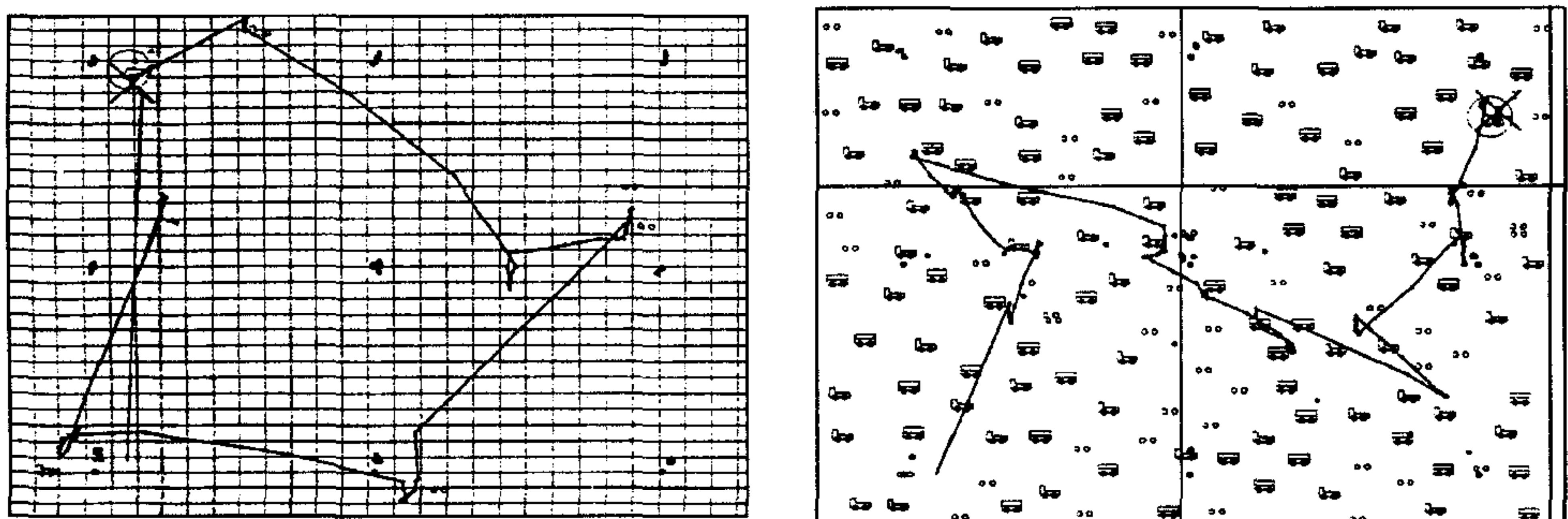
不少作者给出定义描述在眼的单次扫视(一瞥)中的可见范围. Norman Mackworth 称其为可用视域(the useful field of view)^[2],定义为凝视点周围的一个区域,在一个给定视觉任务中,在这个区域内的视觉信息可被存储或处理;F. L. Engel 称其为空间显著可见区(conspicuity area)^[3],它是物体能被眼睛的一瞥所发现的视网膜区域. Widdle, Kaster, 和 Kraiss 称其为视力角(the visual lobe area)^[4,5].所有这些术语都表明同一个概念,即:围绕着中心凝视点周围多大的区域内特定的视觉信息可以被提取出来?

本文通过计算成功扫视幅度的中值,即 Msss(Median successful saccade sizes),来量度视力角.成功扫视被定义为:从上一次凝视点经过眼的一次扫视运动,直接凝视在目标靶上,这就隐含着,搜索目标必然存在于以上一次凝视点为中心的眼的视力角范围之内^[4].文中将讨论视力角与搜索场景对比度,及物体密度的关系,并揭示全局搜索策略对于视力角的依赖.最后给出正态分布(高斯)模型来拟合实验数据.

2 实验方法

2.1 搜索场景

搜索场景由计算机图形学技术产生,典型的搜索场景(图1)包括若干随机分布的小轿车作为目标靶(图中靶由大圆圈标注出来,实验中这些圆圈并不出现,而只出现在测试结果中;×是被试发现目标靶时按下空格键后程序作出的标记);一些随机分布的卡车,箱式车,成对的车轮等作为靶的干扰物;靶和干扰物体的总数在不同场景中为4—160不等,在每个搜索场景中典型的靶的数目为1,7和20.



(a)高对比度、低干扰物密度条件下的眼动轨迹

(b)高干扰物密度、单靶搜索的眼动轨迹

图1 视觉搜索场景及搜索过程中的眼动轨迹

一个用于干扰物多少的量度的参量(干扰物密度) d^* 由 L. W. Stark 教授定义为

$$d^* = n \times a/A \times \phi = n \times 50 \times 50/(1024 \times 1280) \times 0.65. \quad (1)$$

这里, n 代表每一场景中的干扰物数; ϕ 为靶和干扰物之间的交叉相关系数(cross-correlation,靶与干扰物之间相似程度的量度); a 为干扰物的面积, A 为搜索场景的面积. d^* 在与本文有关的实验分组中从0.005到0.2之间变化.除干扰物的多少变化外,搜索场景还在对比度上有四种变化,即 $C_m = 0.08, 0.11, 0.22, 0.33$.这里 C_m 为调制对比度,或米切尔逊

(Michaelson)对比度,定义为

$$C_m = [I_c - I_b]/[I_c + I_b], \quad (2)$$

式中 I_c 代表字符或图形轮廓线的照明度, I_b 代表背景照明度.

2.2 实验装置

功能强大的图形工作站控制整个实验. 眼动的测量借助于角膜反射技术. 一束红外光射向被试的左眼, 虽然被试用双眼搜索, 但实验仅记录了左眼的运动. 通过调整 TV 摄像机的镜头, 使之对准被试的左眼的反射光束, 摄像机的信号送给计算机, 这些信号被眼追踪程序和自顶向下图像处理软件所处理. 随后程序将显示红色的光点用于在场景中指示被试的相继凝视点, 用作给被试的实时反馈信号. 被试的头部被一个特制的头-下额支架所固定, 眼距离显示的场景大约23英寸. 这样, 搜索场景对于被试的眼所张开的视角范围为29.2度(宽)×21度(高).

2.3 实验过程

在实施搜索任务之前, 被试先要通过校准程序, 以使得我们的眼追踪程序将眼动轨迹记录并描画在适当的屏幕坐标上, 从图1左图可明显看出校准程序生成的9个校准点; 随后, 搜索场景出现在被试面前, 直至被试完成搜索任务. 被试被告知不能回扫已搜索过的区域, 发现目标靶时要按下空格键声明靶的发现(图1中有×的位置对应靶的发现). 当整个场景搜索完成时, 应按下 ESC 键, 此时屏幕上的场景立即消失, 随后跟着是搜索后的校准程序.

两名被试对本实验方法较熟习, 两人都有正常视力.

2.4 数据处理

眼动数据(时间序列, 眼动坐标)以每秒 50次的采样速率采集. 记录下来的眼动轨迹数据将被描绘出来, 迭加在原搜索场景上作为图形化的结果. 图1给出这种实验结果的例子. 此外, 使用 Stark 实验室的“findFix”程序还可按顺序描画出凝视点序列, 并给出序号. 比较这两种图形化结果, 便可知对应靶的发现的是第几号凝视点. 然后可计算一系列成功凝视点与靶之间的距离. 此外, 从我们的实验数据还可知道累积的靶发现时间序列. 有了这些数据及方法, 我们可以研究影响视力角大小的物理因素和注意力因素, 并可探索视觉过程的物理模型.

3 实验结果分析及讨论

3.1 M_{ss} 与 d^* , C_m 之关系

表1 在高干扰物密度下视力角随对比度的变化

对比度	$C_m=0.08$	$C_m=0.11$	$C_m=0.22$	$C_m=0.33$
M _{ss} -被试1	1.50	1.66	1.95	2.38
M _{ss} -被试2	1.21	1.51	1.85	2.19

如引言部分所述, 作者试图用成功扫视幅度的中值 M_{ss} 作为视力角的量度. 表1给出两个被试在不同场景对比度下的成功扫视幅度之中值. 在这些实验的场景中干扰物数目为160($d^* = 0.2$). 从表1可以看出, 当 C_m 增强时, 视力角也跟着增强, 但变化不明显.

图2显示出对比度对于 M_{ss} 的影响如何随着干扰物密度 d^* 而变化. 图中每条曲线

的四个数据点对应于 $d^* = 0.005, 0.014, 0.028, 0.087$, 即场景中干扰物数目为 4, 11, 22, 68 等四种情况; 两图中上部的黑实线对应场景对比度为 $C_m = 0.33$, 即高亮度的情况; 下部虚线对应对比度为 $C_m = 0.11$, 即低亮度情况. 当干扰物密度低时, 对比度有较强的影响, 而当干扰物密度高时, 对比度对于 M_{ss} 的变化影响不大. 同样的, 只要搜索场景的对比度不是太差以至于物体无法辨认, d^* 便是影响 M_{ss} 变化的主要因素. 很明显, 较小的 d^* 对应较大的 M_{ss} , 在一个物体稀少的场景中, M_{ss} 大约为 $7 \pm 2(^{\circ})$.

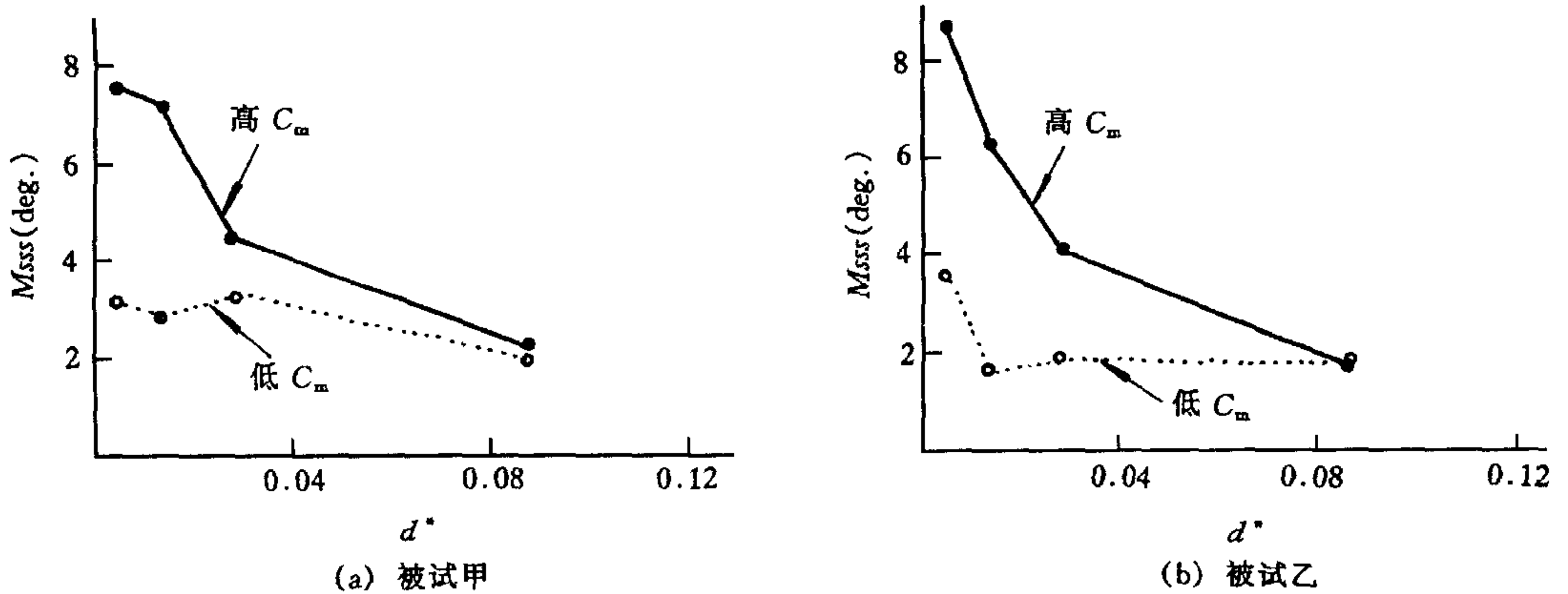


图2 实验条件对扫视幅度的影响

3.2 眼动与全局搜索策略

全局搜索策略即搜索场景的视觉覆盖过程. 通常是由搜索者在开始搜索之前产生, 这种策略还常常基于某些视觉信息, 例如, 搜索场景的照明度, 干扰物密度, 和对于本身视力角大小(或搜索仪器的镜头覆盖范围)的估计; 即, 在一瞥之间能看到多远. (作者本人和 Stark 教授等曾在“Efficiency of Searchpatterns”一文中讨论了多种不同的全局覆盖模式^[6]). 当对比度很高, 场景中物体稀少(图1(a))或者目标靶与其它物体的相似性很低时, 对应的视力角将较宽广, 扫视眼动主要被周边视觉信息所引导, 常常越过非靶元素, 直接扫向类似靶的物体以进行识别. 当搜索场景对比度 C_m 很低时, 由于靶难以被识别, 搜索者往往采用逐排系统扫描的搜索策略, 眼动过程中有规律的逗留, 以获取视觉信息. 这种眼逗留之间的扫视幅度之中值指明了搜索者对于自己视力角大小的主观估计.

在二维视觉搜索中, 扫视眼动是由全局覆盖策略和被周边视觉信息的激发引导所形成的瞬间调节所共同控制. 我们的实验数据证实了这一假设. 图3是一个过度扫视的例子.

两次过度扫视, 然后是倒退-核实, 图中一个是凝视点序列 13-14-15, 另一个是 23-24-25. 凝视点 13 在靶的附近, 周边视觉获取了靶的信息, 但来不及调整路线. 凝视点 14 是按原来的覆盖策略的预定路径扫视的结果, 凝视点 15 返回来核实靶的存在. 这一现象暗示我们, 眼动是由全局策略, 或者说是预言算子(pre-

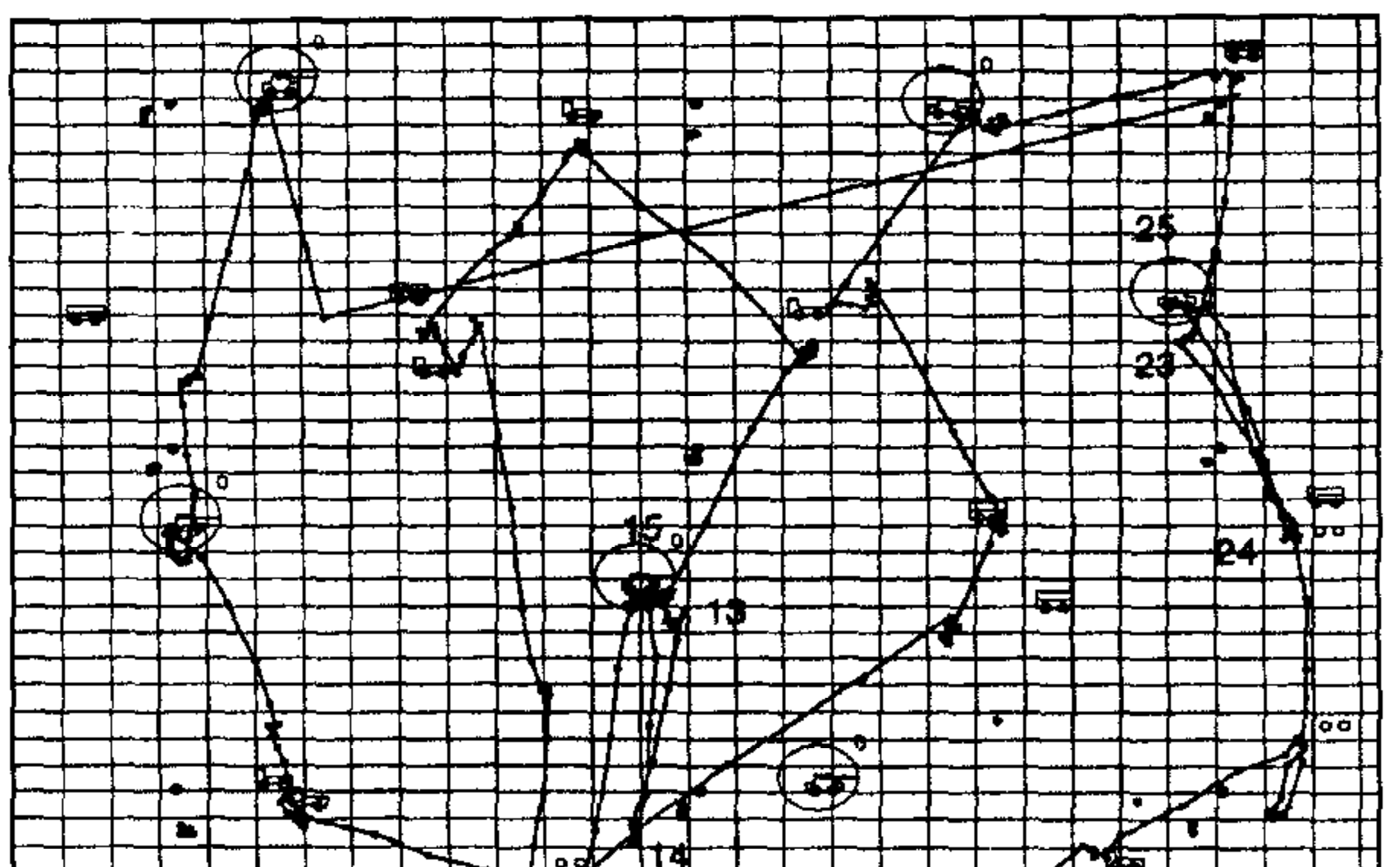


图3 由于反应滞后造成的过度扫视

diction operator)所引导. 预言算子是指利用输入信号的重复性或其它可预见的方面来补偿神经学上的计算延迟^[7];有时仅在下一个凝视点上才能发现靶. 这就是说,在凝视点 $N+1$ 上才能完成凝视点 N 上视觉信息的计算,换句话说,依赖于预言算子,扫视 $N+1$ 甚至扫视 $N+2$ 可能发生在对凝视点 N 的计算完成之前. 如果扫视仅由周边视觉中的事件所驱动,则不应发生过度扫视然后返回核实的现象.

4 高斯模型及讨论

由图2可以看到 C_m 和 d^* 之间有趣的相应而相反的作用,当对比度 $C_m=0.11$ 或更低时,对比度 C_m 成为扫视幅度的主要制约因素,干扰物密度 d^* 的变化对扫视幅度影响不大;而当 d^* 接近0.09或更高时,则几乎看不出 C_m 的作用. 此时干扰物密度成为主要制约因素. 用正态分布,或高斯模型来近似地拟合实验数据,公式如

$$p(\delta, \phi) = p(0) \cdot e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \cdot \kappa(\phi). \quad (3)$$

这里, $P(\delta, \phi)$ 用来描述在偏心度为 δ 、方向角为 ϕ 处靶的探测几率; $P(0)$ 等于在眼的一瞥期间视网膜中心凹注视在靶上的靶探测概率; σ 等于标准偏差; δ 等于偏心度,即从凝视点到靶的距离; ϕ 等于凝视点相对靶的方向角^[5]. 在某些情况下,视力角区域呈现不对称形式,可能在颞向较宽,而在鼻向较窄. 为简单化,这里假设一个圆形视力角区域(即, $k(\phi) = \text{常数}$). (3)式中, $P(0)$ 由视觉敏度所决定,当 $\delta = M_{\text{sss}} = 1.18\sigma$ 时, $P(\delta) = 0.5P(0)$, 此时偏心度 δ 对应探测几率下降到一半时的偏心度. 许多作者(如:参考文献[2],[3])对于视力角的研究是让被试者维持其注视点在显示屏中央,而使刺激信息依次出现在周围不同方位,不同偏心度处,用统计学的方法测量被试者发现或识别刺激物的能力的下降情况,以发现概率下降到50%时的偏心度作为视力角的量度. 故我们在(3)式中可以用 σ 代替 M_{sss} 来描述视力角的大小. 图4是视力角的二维轮廓图,其中粗黑圆环对应于 $p(\sigma, \delta) = 0.5p(0)$. 从实验结果可知,当 $d^* = 0.2$ (干扰物数为160)或者 $C_m = 0.08$ (这时物体难于被辨认),视力角在 $2 \pm 1(^{\circ})$ 的范围内变化(表1). 但是对于高对比度和场景中仅有稀疏物体时,视力角的变化幅度可达 $5-6(^{\circ})$. 图4左图对应的标准偏差 $\sigma = 4$, 右图对应的标准偏差

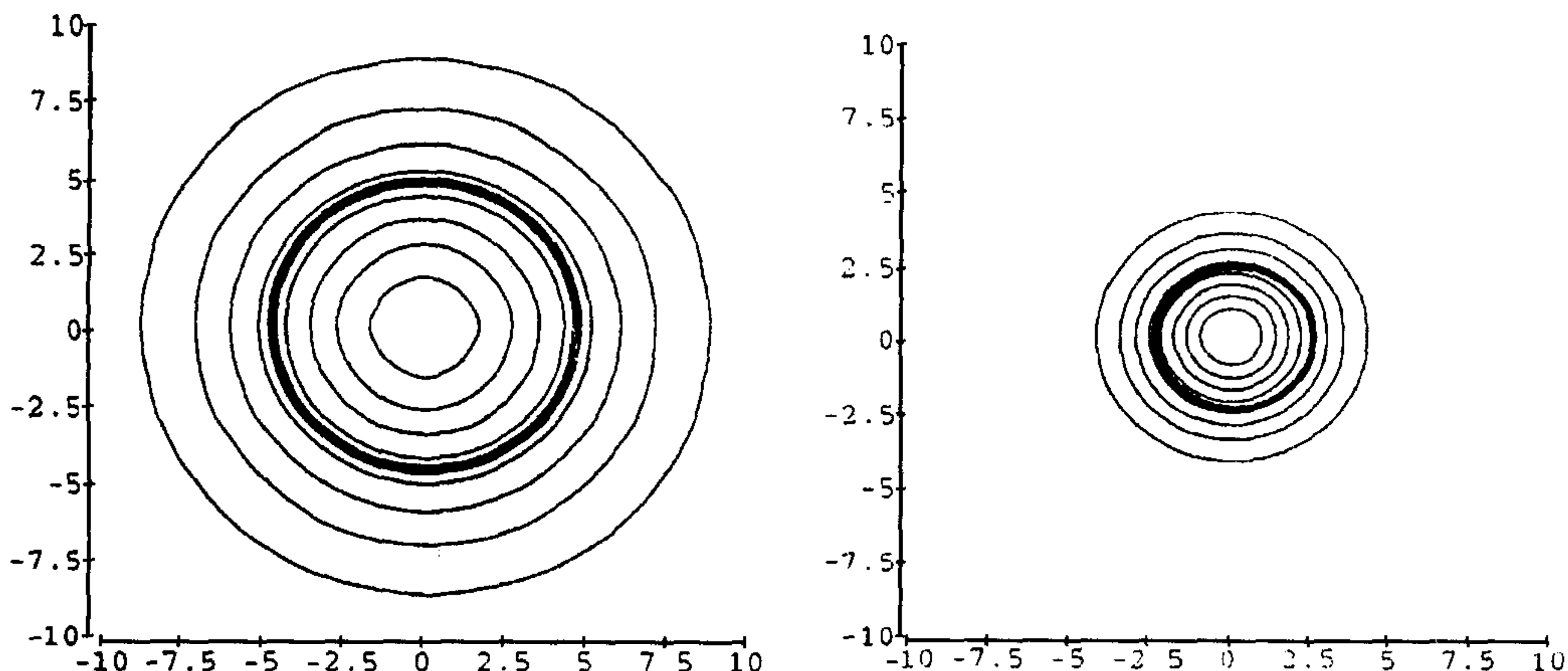


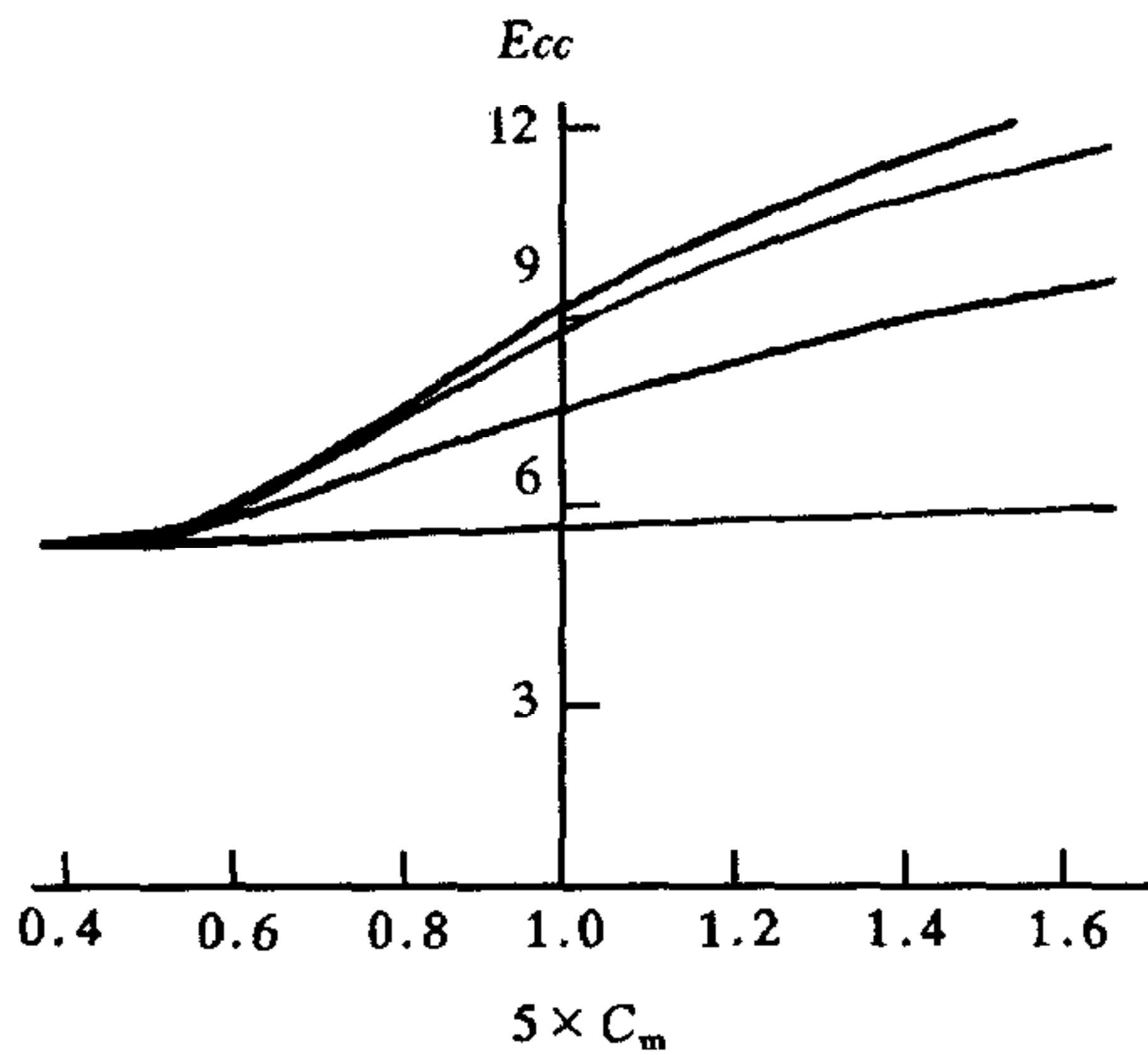
图4 视力角的高斯模型

$\sigma=2$,以便与实验结果相比拟.

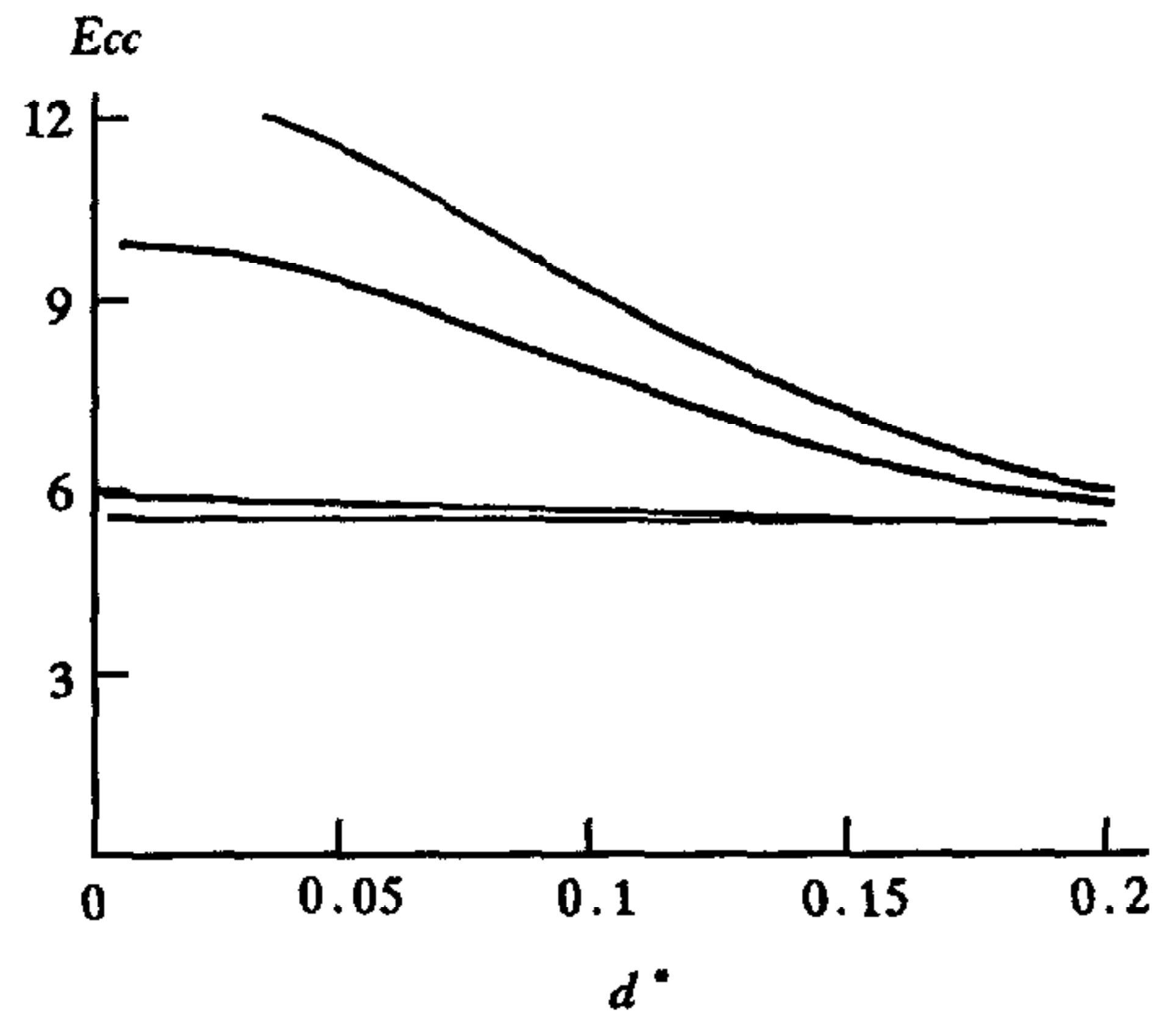
从 Msss 的变化趋势来看, Msss 是 C_m 和 d^* 的指数函数,因为指数函数对于不同的变化速率有不同的分段值,试选择下列参数来近似地描述 d^* , C_m 和视力角 ($Msss = 1.18\sigma$) 之关系.

$$\sigma(C_m, d^*) = k_1 \cdot e^{-\left(\frac{1}{k_2 \cdot C_m}\right)^2} \cdot e^{-(k_3 \cdot d^*)^2} + k_4 = k_1 \cdot F_1 \cdot F_2 + k_4. \quad (4)$$

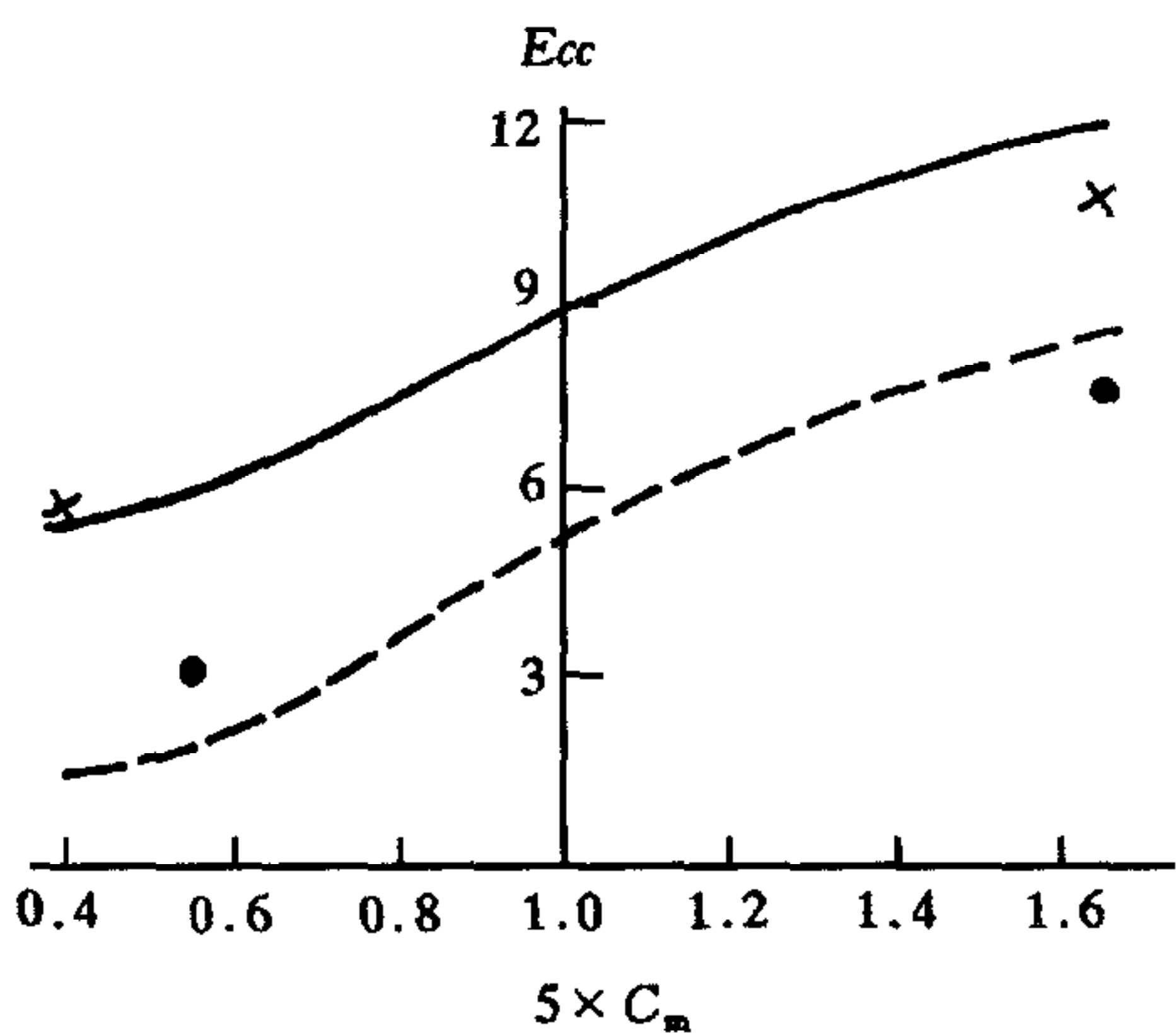
令 $k_1=10, k_2=5, k_3=8, k_4=1.5$ 代入式中,用于拟合在二维视觉搜索实验中的视力角. 这个模型不仅描述了干扰物和对比度对于视力角的影响,而且还反映了二者之间的互补作用. 从模型可以看出,当 d^* 较小时, C_m 的影响较明显;而当 C_m 较高时,可看出 d^* 对视力角的显著影响. 很明显,低对比度和高干扰物密度将分别成为视力角的唯一的主要限制因素. 固定 d^* , 将 d^* 代入实验中所采用的数值,即 0.005, 0.014, 0.028, 0.087, 我们可以看到 σ (即 Ecc) 如何随着 C_m 的变化而变化(图5上左). 固定 C_m , 将实验中的对比度数值 0.08, 0.11, 0.22, 0.33 代入 C_m , 我们可以看到 σ (即 Ecc) 如何随着 d^* 而变化(图5上右,将该图与图2比较,可看出其相似性). 图5下部为模拟结果与实验数据的比较.



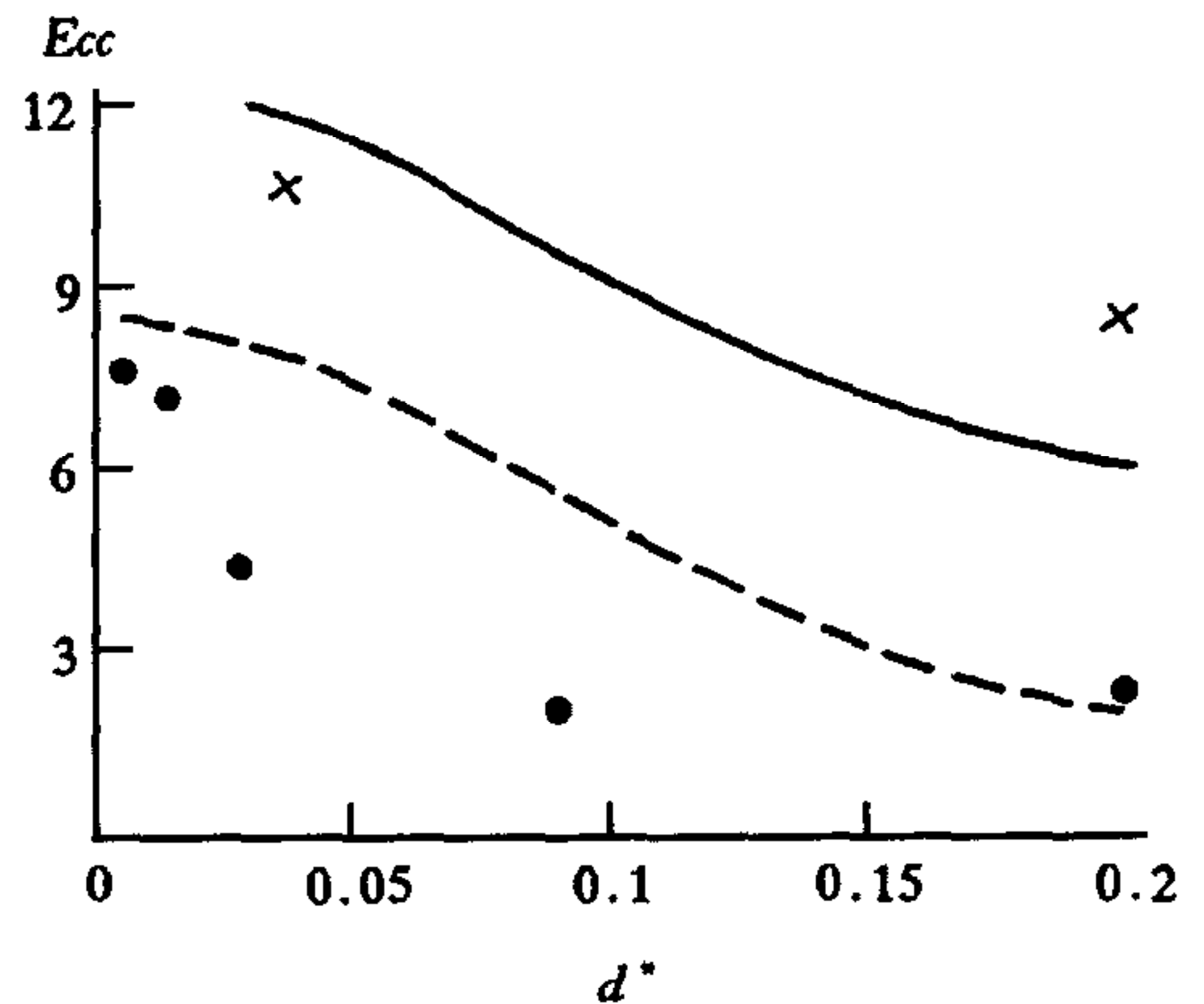
(a)由视力角高斯模型得出:视力角(Ecc)随 C_m 的变化
由上到下4条曲线对应于由低到高4种 d^* 实验值



(b)由视力角高斯模型得出:视力角(Ecc)随 d^* 的变化
由上到下4条曲线对应于由高到低4种 C_m 实验值



(c)低干扰物密度(d^*)下视力角(Ecc)随 C_m 的变化
实线:由模型得出;虚线:由实验数据拟和



(d)高对比度(C_m)下视力角(Ecc)随 d^* 的变化
实线:由模型得出;虚线:由实验数据拟和

图5 高斯视力角模型拟和实验数据

致 谢 作者感谢在美国加州大学伯克利分校的 L. W. Stark 教授所提供的科研条件和指导,感谢在他实验室工作的同事们的杰出工作——他们通过共同努力所建立的眼动测量装置和计算机程序.

参 考 文 献

- 1 Stark L W, Ellis S R. Scanpaths Revisited; Cognitive Models Direct Active Looking. In: Fisher Monty & Senders (Eds.), *Eye Movements; Cognition and Visual Perception*. New Jersey; Erlbaum Press, 1981, 193—226.
- 2 Mackworth N H. Stimulus Density Limits the Useful Field of Views. In: R. A. Monty & J. W. Senders (Eds.), *Eye Movements and Psychological processes*. Hillsdale, NJ; Lawrence Erlbaum Associates, 1976, 307—321.
- 3 Engel F L. Visual Conspicuity, Visual Search and Fixation Tendencies of the Eye. *Vision Res.* Pergamon Press, Great Britain. 1977, 17: 95—108.
- 4 Widdle H, Kaster J. Eye Movement Measurements in the Assessment and Training of Visual Performance. In: J. Moraal and K. F. Kraiss (Eds.), *Manned Systems Design, Methods, Equipment, and Applications*. New York; Plenum, 1981, 251—270.
- 5 Kraiss K, Knaeuper A. Using Visual Lobe Area Measurements to Predict Visual Search Performance. *Human Factors*, 1982, 24(6), 673—682.
- 6 Zhou G H, Ezumi K, Stark L W. Efficiency of Searchpatterns. *Computers in Biology and Medicine*. 1993, 23: 511—524.
- 7 Stark L W. The Control System for Versional Eye Movements. In: *The Control of Eye Movements*, Bachy Rita, Collins, and Hyde, Editors. New York; Academic Press, Inc. , 1971, 363—428.

周果宏 女, 1943年5月出生于山东省掖县, 1966年毕业于中国科技大学近代物理系. 毕业后在核工业部第九研究院电子学研究所工作十余年, 随后调往郑州大学任教. 发表论文30余篇. 1991年8月至1993年12月在美国加州大学伯克利分校做访问学者. 在斯塔克教授指导下从事眼动和视觉搜索研究, 期间曾有三篇学术论文在国外期刊和学术会议论文集上发表. 现为首都医科大学生物医学工程系副教授.