

朝向和对比度同时快速变化条件下的分辨能力*

刘冰^{1,2)} 王毅^{1)**}

(¹⁾中国科学院生物物理研究所, 脑与认知科学国家重点实验室, 北京 100101; (²⁾中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 在自然的视觉中, 投射到视网膜上的视觉图像总是在不停地变化, 而人类的感知系统依然可以准确高效地识别物体。因此, 人类的感知系统有相应的快速处理机制以应对这种动态变化。然而, 前人的实验都是在相对稳定的刺激条件下研究人类被试的感知系统对一个刺激参数的反应, 比如在固定对比度下测试朝向分辨能力, 或在固定朝向测定对比度分辨能力, 而朝向和对比度同时变化时, 人类对这两个参数的分辨能力仍然缺乏研究。因此, 在本实验中, 我们使用朝向和对比度同时变化的刺激, 研究了人类被试对朝向和对比度的分辨能力。结果表明, 在这种动态变化的条件下, 被试对朝向和对比度的分辨阈值都有显著性的降低。而且, 朝向分辨阈值降低的幅度与在固定对比度参数条件下的分辨阈值成负相关, 即在固定对比度条件下朝向分辨阈值较高的被试, 在朝向和对比度同时变化条件下, 其朝向分辨阈值降低的幅度相对要大, 朝向分辨能力也就相对地提高更大。对比度分辨能力也呈现同样的规律。这些结果说明, 朝向和对比度的同时变化提高了被试对朝向和对比度的分辨能力, 一个参数变化时其分辨能力越低的被试, 两个参数变化时其分辨能力提高的幅度就越大。揭示了视觉系统处理这种多刺激参量信息变化的能力和机制, 对人类视觉系统在真实的视觉过程中如何处理朝向和对比度信息提供了认识。

关键词 心理物理, 朝向, 对比度, 动力学, 分辨能力, 阈值

学科分类号 Q189

DOI: 10.3724/SP.J.1206.2012.00551

朝向和对比度是视觉物体的两个基本特征, 也是大脑视觉系统处理外部信息的两个重要变量。以往对朝向分辨能力和对比度分辨能力的研究普遍采用只变化所研究的变量的方法, 即在恒定对比度下测定朝向的分辨能力, 或在恒定朝向测定对比度的分辨能力。然而在自然的视觉中, 人们观测到的景物总是随着物体的运动和身体、头、眼睛的运动而变化^[1]。甚至在注视的过程中, 落入眼中的景物也会随着微眼动而不停地在改变^[2-3]。若通过实验手段把眼动信息反馈到视觉刺激, 使视觉刺激随眼睛同步运动, 即去除微眼动, 维持物体在视网膜上的图像稳定不变, 则落入眼中的物体图像会由于适应而消失, 被知觉为不可见, 从可见到不可见的时程被认为小于 80 ms^[4]。因此, 视觉系统观测的是一个不停变化的、动态的世界, 也必然存在一种快速的动态机制来处理相关的视觉信息, 从而保证我们能够正确地感知外部世界^[1,5]。但是, 在这种多

个特征同时变化的情况下, 对视觉系统分辨刺激特征的能力的研究目前仍然缺乏。

我们使用朝向和对比度同时变化的刺激模式, 即在对对比度变化条件下测量被试对朝向的分辨能力, 在朝向变化条件下测量对对比度的分辨能力, 并与相应地固定其中一个参数(朝向或对比度)时, 测量另一个参数(对比度或朝向)变化得到的分辨能力进行比较, 研究了人类被试对朝向和对比度的分辨能力。

* 国家高技术研究发展计划(863)(2007AA02Z313), 国家自然科学基金(30623004, 30870831)和中国科学院知识创新工程(KSCX1-YW-R-32)资助项目。

** 通讯联系人。

Tel: 010-64888453, E-mail: yiwang@ibp.ac.cn

收稿日期: 2012-11-09, 接受日期: 2012-12-04

1 材料与方 法

1.1 被 试

被试是 18 名在校研究生(4 男, 14 女, 所有被试均来自北京地区高校), 年龄在 20~30 岁之间, 矫正视力正常. 所有被试均未参与过类似的心理物理实验.

1.2 实验刺激与流程

实验中, 视觉刺激由 C# 语言编写的程序产生, 使用饭山(Iiyama)204DTA 显示器(刷新率 200 Hz, 分辨率 800 pixels×600 pixels, 显示面积 40 cm×30 cm)呈现给 57 cm 远的被试.

视觉刺激为静止的圆盘状正弦光栅(图 1, $SF=0.4$ deg/cycle), 直径为 5 度, 平均亮度为 16 cd/m², 背景亮度也为 16 cd/m², 对比度、朝向随机变化. 每次任务开始时, 首先被试眼睛固定于出现在视野中心的十字(图 1), 然后呈现一个刺激, 刺激时间为 40 ms, 之后为 400 ms 的空白(即为刺激光栅平

均亮度的灰屏, 16 cd/m²), 再呈现 40 ms 的第二个刺激. 参考刺激和测试刺激根据实验不同调整, 参考刺激和测试刺激随机地可为第一个刺激或第二个刺激. 在第二个刺激消失后, 被试需判断参考刺激与测试刺激的对比度或朝向是否一致. 被试做完一次判断(一个 trial)后, 下一次任务自动开始. 我们采用阶梯法(三上一下, three-up one-down, 双因素迫选, 2AFC)测量被试对朝向或对比度的分辨阈值. 采用阶梯法时, 首先选定测试刺激的初始值, 实验开始后根据被试对检测刺激的分辨情况改变所研究参数的量值(检测刺激), 当被试进行 3 次正确判断后(三上, three-up), 参考刺激与测试刺激的差异下降 50%, 而每当被试进行一次错误判断后(一下, one-down), 该差异则增长一倍. 实验中所呈现的测试刺激值为参考刺激值加差值或参考刺激值减差值的随机选择. 当测试刺激与参考刺激差异变化方向改变 6 次之后, 则认为达到分辨阈值, 所得到的结果为 79%正确率条件下的分辨阈值^[6].

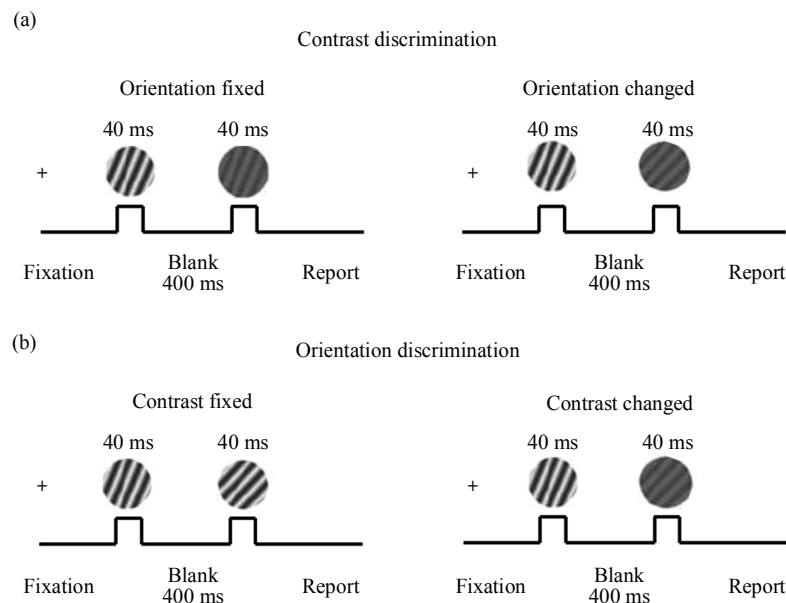


Fig. 1 Psychophysical tasks

(a) Contrast discrimination. Orientation fixed condition: two stimuli had the same orientation but different contrasts; Orientation changed condition: two stimuli had different orientations and different contrasts. (b) Orientation discrimination. Contrast fixed condition: two stimuli had the same contrast but different orientations; Contrast changed condition: two stimuli had different contrasts and different orientations. The stimuli were sine wave gratings of 5° in diameter with the mean luminance of 16 cd/m². The threshold for orientation discrimination or contrast discrimination was measured using a temporal three-up one-down two-alternative forced choice (2AFC) procedure. The two stimuli were presented for 40 ms with an interval of 400 ms in random order in each trial. Cross: fixed point.

实验分为对比度分辨能力和朝向分辨能力两部分.

在对比度分辨实验中(图 1a), 使用 0.5 对比度作为参考对比度, 而初始对比度与参考对比度相差

0.35, 即 0.15 或 0.85 对比度. 被试任务为判断前后出现的两个光栅对比度是否一致, 随着实验进行, 测试对比度与参考对比度的差异逐渐减小而得到分辨阈值(阶梯法). 在固定朝向条件下, 我们使用 45° 朝向或 30° 朝向的光栅作为视觉刺激, 而在动态条件下, 我们依然使用 45° 朝向或 30° 朝向的光栅作为基准, 但前后出现的光栅的朝向差异为 10° 或 15° .

朝向分辨实验采用类似对比度分辨的方法(图 1b), 使用 45° 朝向作为参考朝向, 测试朝向初始值与参考朝向相差 40° , 即为 5° 或 85° . 被试任务为判断前后出现的两个正弦光栅的朝向是否一致. 随着实验的进行, 测试朝向会逐渐向参考朝向靠近, 最后得到朝向分辨阈值. 在动态实验中, 前后出现的光栅对比度分辨阈值为 0.5 和 0.9 或者 0.9 和 0.5, 而在固定对比度条件下, 前后两个刺激的对比度均为 0.5 或 0.9.

1.3 数据分析

使用 MatLab 程序对数据进行分析 and 函数拟合.

2 结 果

2.1 对比度分辨能力

我们首先比较了在固定朝向与变化朝向条件下, 对对比度的分辨能力. 实验中, 固定朝向(FixO)使用 45° 的倾斜朝向; 在朝向同时变化条件下, 测试刺激以及参考刺激所使用的朝向也均为倾斜朝向(见 1.2 节). 图 2a 为 18 名被试在固定朝向与变化朝向条件下对比度分辨阈值比较的散点图. 图中对角线(虚线)表示在两种情况下分辨阈值相同. 如图 2a 所示, 绝大部分被试在变化朝向情况下的对比度分辨阈值更低. 有 3 名被试在固定朝向条件下有较小的对比度分辨阈值. 如图 2c 所示, 在固定朝向条件下(FixO), 被试对对比度(参考对比度为 0.5)的分辨阈值为 0.18 ± 0.02 ($\bar{x} \pm s.e.m$), 而在变化朝向条件下(Mixed), 对比度的分辨阈值为 0.13 ± 0.02 ($\bar{x} \pm s.e.m$). 两种条件下的阈值差异显著(paired *t*-test, $P < 0.01$). 整体来说, 变化朝向的刺激可以提高对对比度的分辨能力, 即降低其分辨阈值.

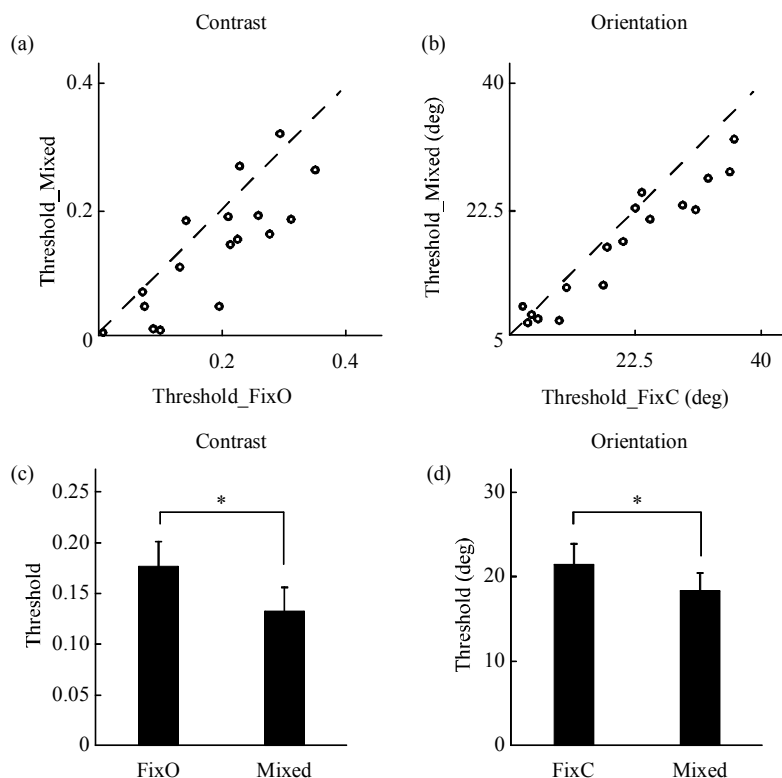


Fig. 2 Discrimination thresholds at Fixed and Mixed conditions for contrast and orientation

(a) Scatter plot of contrast thresholds of individual subjects between FixO and Mixed conditions. (b) That of orientation thresholds between FixC and Mixed conditions. The dashed lines in (a, b) are the diagonal lines. (c) The mean thresholds of contrast discrimination of FixC and Mixed conditions. (d) That of orientation discrimination of FixC and Mixed conditions. * $P < 0.01$, paired *t*-test, $n=18$. Error Bars: s.e.m.

2.2 朝向分辨能力

对于朝向分辨能力, 在固定对比度(FixC)条件下, 我们分别使用了 0.5 或 0.9 对比度作为参考光栅的对比度. 而在对比度同时变化(Mixed)条件下, 前后呈现的光栅对比度为 0.5 和 0.9 或者 0.9 和 0.5. 图 2b 为被试在固定对比度与变化对比度条件下朝向分辨阈值的散点图. 绝大部分被试在对比度变化条件下的朝向分辨阈值低于对比度不变的情况. 在朝向分辨结果中, 也有三名被试在固定朝向条件有较小的分辨阈值. 在固定对比度条件下, 阈值为 $(21.39 \pm 2.46)^\circ$ (图 2d, FixC 为 0.9 固定对比度条件). 而在变化对比度条件下, 平均分辨阈值为 $(18.32 \pm 2.08)^\circ$ (图 2d, Mixed 为前后光栅对比度为 0.5 和 0.9). 在两种条件下的分辨阈值差异显著 (paired *t*-test, $P < 0.01$). 因此整体来讲, 对比度的同时变化可以提高朝向分辨能力.

实验中, 为排除不同对比度带来的刺激强度的影响, 我们也测量了固定对比度为 0.5 时的朝向分辨阈值. 在对比度为 0.5 的固定对比度条件下, 朝向的分辨阈值为 $(20.78 \pm 1.79)^\circ$, 与前后对比度为 0.5 和 0.9 的同时变化对比度条件下的朝向分辨阈值 $(18.67 \pm 2.46)^\circ$ 依然差异显著 (paired *t*-test, $P = 0.02$), 而与固定对比度为 0.9 条件下的朝向阈值差异不显著 (paired *t*-test, $P = 0.66$). 我们把前后对比度为 0.5 和 0.9 的变化对比度条件下的朝向分辨阈值分成,

- 前后光栅对比度为 0.9 和 0.5 的变化对比度和
- 前后对比度为 0.5 和 0.9 的变化对比度, 进行

比较, 二者朝向分辨阈值差异不显著 (paired *t*-test, $P = 0.75$), 而与 0.9 固定对比度条件下朝向分辨阈值 $(21.39 \pm 2.46)^\circ$ 同样差异显著 (paired *t*-test, both $P < 0.05$). 因此, 变化对比度带来的朝向分辨阈值的变小不能用前后对比度的差别来解释, 而是其变化引起的.

2.3 朝向与对比度同时变化引起的分辨阈值变化与固定其中一个变量时分辨阈值的关系

为进一步研究朝向与对比度同时变化条件下分辨能力的提高, 我们分析了分辨阈值的提高与相应固定刺激条件下阈值的关系, 探讨两者之间是否也存在着类似韦伯定律的关系. 图 3a 为变化朝向条件下对比度分辨阈值的降低与固定朝向条件下对比度分辨阈值的比较. 由于比较的是朝向变化条件对分辨能力提高与朝向不变条件阈值之间的关系, 因此只考虑在朝向变化条件下阈值降低的结果 (图 3a 中的圆点). 结果表明, 朝向变化条件下对比度分辨阈值的降低与固定朝向条件下对比度分辨阈值负相关. 回归分析得到相关系数为 -0.65 , 对比度回归曲线的斜率为 -0.28 ($P < 0.01$, 图 3a). 朝向分辨能力的分析结果相似 (图 3b), 变化对比度条件下朝向分辨阈值的降低与固定对比度条件下的朝向分辨阈值负相关, 相关系数为 -0.71 , 朝向回归曲线的斜率为 -0.16 ($P < 0.01$, 图 3b). 图 3 中黑色实线表示线性回归曲线. 通过这样的分析, 可以了解动态刺激变化相对于阈值改变的效应的强度.

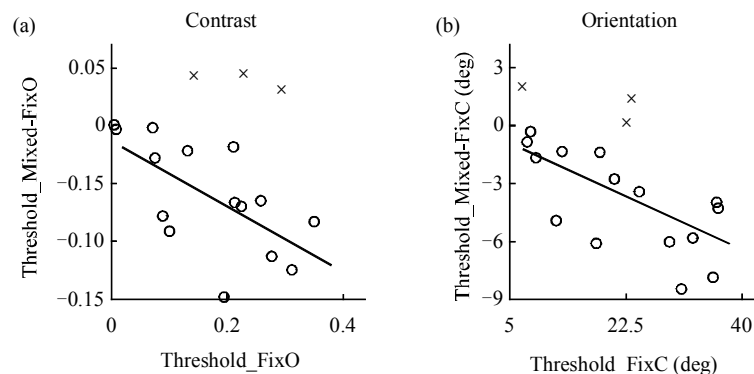


Fig. 3 Correlation between threshold decrements and thresholds in the Fixed condition

(a) Contrast threshold differences between Mixed condition and FixO condition were plotted against contrast threshold of FixO condition. (b) Orientation threshold differences between Mixed condition and FixC condition were plotted against contrast threshold of FixC condition. Dark lines in (a, b) are the linear regression of the data. Correlation coefficient: -0.65 (a) and -0.71 (b), both $P < 0.01$. The three "x" in (a, b) indicate the data points are over the diagonal line of Figure 2a, b, respectively.

3 讨 论

用朝向和对比度同时变化的动态刺激, 我们研究了人类被试对朝向和对比度的分辨能力. 结果表明, 在更为接近自然刺激变化的条件下, 被试对于对比度和朝向的分辨能力都会有所提高. 分辨阈值的降低与在相应固定条件下的分辨阈值有关, 两者成负相关.

对于朝向分辨能力, 前人结果表明, 当实验刺激相对较小且刺激对比度相对较低时, 不同对比度强度(其刺激的对比度是固定的)可能会对朝向分辨结果产生一定的影响^[7]. 为排除刺激大小和不同的固定对比度对朝向分辨的影响, 我们使用了相对较大的实验刺激(5°)以及相对较高的对比度刺激(在自然的视觉中, 0.5 以及 0.9 对比度均为相对较高对比度). 同时, 在固定对比度刺激条件时, 我们分别使用 0.5 和 0.9 两种对比度来比较对朝向分辨能力的影响. 结果表明, 在 0.5 以及 0.9 固定对比度时, 朝向分辨能力差异不显著. 与之相对, 在对比度变化条件下, 朝向的分辨阈值则会相应降低, 且差异显著. 因此, 对于不同刺激朝向的感知是依赖对比度的变化, 而非依赖对比度的绝对值, 或者对于对比度的绝对值的依赖性相对较弱, 而对于对比度的相对变化则依赖程度较高. 因此, 当对比度发生变化时, 朝向的分辨阈值会发生相对较大的改变. 同样对于对比度的分辨, 刺激朝向的同时变化会降低对比度的分辨阈值. 在朝向分辨和对比度分辨实验中, 有不同被试的分辨阈值在对比度或朝向同时变化时有小幅度的增加, 可能是这些少数被试在完成朝向和对比度区分任务时采用了不同的方法或策略, 或者这些被试对朝向或对比度的分辨阈值在这种条件下已经饱和, 不能再进一步降低, 或者在这些被试中, 朝向同时变化产生的线索(cue)对对比度的分辨与只有对比度变化产生的线索对对比度的分辨, 有不同的效应. 同样, 对朝向的分辨, 这些被试在两种对应的条件下也可能有不同的效应. 这些效应可能仍需进一步研究. 然而, 在我们较大样本中($n=18$), 有绝大多数被试(83%, 15/18)在朝向和对比度同时变化时, 相对地提高了对这两个参数的分辨能力, 说明这是在大多被试中都存在的普遍机制.

前人研究了刺激大小、对比度、时间频率对朝向区分能力的效应^[7-9], 但还没有人研究对比度与

朝向同时变化条件下, 朝向与对比度之间相互作用对这两个参数区分能力的影响. 前人实验结果表明, 在更多的维度上改变刺激参数可以提高对整体图形的检测效率^[8-9], 认为对于朝向和对比度的光栅刺激来讲, 朝向和对比度同时变化后的联合分辨能力会高于对朝向或对比度单独变化的分辨能力. 而且, 联合的分辨能力与原分辨能力之间为欧几里德加和(Euclidean summation)的关系, 当信息来自两个独立信息通路的约束条件下, 欧式度量(Euclidean metric)则被认为是最优的信息整合方式^[9]. 然而, 这些研究者并没有对这两个参数分别进行测量和研究. 在我们的研究中, 更为关心的是当刺激图形在更多的维度上发生改变之后, 感知系统对其中某一维度上的检测能力是否也会有所提高, 这在前人的实验中并未给出答案. 我们的结果表明, 当更多的刺激维度发生改变后(朝向和对比度), 感知系统对于其中各个维度刺激本身的检测能力也会相应提高.

此外, 感知系统对于刺激改变的感知是遵循韦伯定律的. 那么在朝向和对比度同时快速变化的条件下, 对朝向以及对比度分辨能力的提高是否也遵循相似的规律呢? 为此, 我们分析了朝向和对比度同时变化条件下分辨阈值的降低与只有其中一个参数变化时的分辨阈值的关系. 结果表明, 无论是朝向还是对比度, 分辨阈值的降低与相应固定条件下的阈值有显著的负相关, 即在相应固定条件下得到较大的分辨阈值时, 动态刺激可以带来更大的分辨能力的提高. 对比度分辨阈值变化的线性回归斜率为 -0.28, 朝向的为 -0.16(图 3). 这一结果表明朝向和对比度同时变化对于对比度检测阈值的影响要大于对朝向的影响, 但对两者的效应都遵循类似韦伯定律的规律, 即对朝向或对比度单独变化时的分辨能力越低, 朝向和对比度同时变化时被试提高的分辨能力就越高.

人类的视觉系统对于动态刺激的敏感和精确的分辨能力是源于一个长期进化的结果, 对于动态刺激的敏感性, 以及对适应刺激的去敏感性都有利于提高感知系统的编码效率. 我们使用的刺激为动态快速变化的刺激, 虽然刺激本身并不是真实的自然条件下的视觉刺激, 但从刺激的时程以及变化性质上比前人实验中所使用的刺激更加接近真实的自然刺激. 所以, 我们的研究结果更有助于阐明视觉系统识别朝向和对比度信息的功能机制.

参 考 文 献

- [1] Geisler W S, Albrecht D G, Crane A M. Responses of neurons in primary visual cortex to transient changes in local contrast and luminance. *J Neurosci*, 2007, **27**(19): 5063–5067
- [2] Martinez-Conde S, Macknik S L, Hubel D H. The role of fixational eye movements in visual perception. *Nat Rev Neurosci*, 2004, **5**(3): 229–240
- [3] Martinez-Conde S, Macknik S L, Troncoso X G, *et al.* Microsaccades: a neurophysiological analysis. *Trends Neurosci*, 2009, **32**(9): 463–475
- [4] Coppola D, Purves D. The extraordinarily rapid disappearance of entopic images. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1996, **93**(15): 8001–8004
- [5] Muller J R, Metha A B, Krauskopf J, *et al.* Information conveyed by onset transients in responses of striate cortical neurons. *J Neurosci*, 2001, **21**(17): 6978–6990
- [6] Levit H. Transformed up-down methods in psychoacoustics. *J Acoust Soc Amer*, 1970, **49**(2): 467–477
- [7] Mareschal I, Shapley R M. Effects of contrast and size on orientation discrimination. *Vis Res*, 2004(1): 57–67
- [8] Reisbeck T E, Gegenfurtner K R. Effects of contrast and temporal frequency on orientation discrimination for luminance and isoluminant stimuli. *Vis Res*, 1998, **38**(8): 1105–1117
- [9] Thomas J, Olzak L. Cue summation in spatial discrimination. *Vis Res*, 1990, **30**(11): 1865–1875

Contrast and Orientation Discrimination in Simultaneous Orientation and Contrast Changes*

LIU Bing^{1,2}, WANG Yi¹**

⁽¹⁾ State Key Laboratory of Brain and Cognitive Science, Institute of Biophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

⁽²⁾ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In natural vision, due to object, body, head, and eye movements, the contrast and orientation information received by our eyes change simultaneously and rapidly, yet our visual system can efficiently and accurately distinguish the contrasts and orientations under the dynamical conditions. The visual processes responsible for discriminating orientations and contrasts occurred at this very short time scale, however, are poorly understood. In the current experiments, we investigated the ability of human subjects to discriminate orientations or contrasts using the briefly presented stimuli in which orientations and contrasts were changing simultaneously in comparison with the stimuli in which orientation changes were discriminated when contrast remained constant or contrast changes were discriminated when orientation was constant. We show that the discrimination threshold for orientation or contrast when both contrast and orientation were varying was significantly lower than that for orientation when contrast was fixed or than that for contrast when orientation was fixed. Moreover, the decreased magnitude of discrimination thresholds to orientation or contrast was negatively correlated to the discrimination threshold to orientation or contrast when only orientation or only contrast was varied. These results indicate that the simultaneous changes in orientation and contrast enhanced the discriminability of subjects to contrast and orientation. The subjects who had lower discriminability to orientation or contrast when only orientation or contrast was changing had a relatively larger enhancement in their ability to discriminate contrasts and orientations when both orientation and contrast were changing simultaneously. We suggest that human visual system is more efficient at discriminating orientation and contrast when both parameters are changing which often occurs in natural environments. Our study sheds light on the underlying visual processes.

Key words psychophysics, orientation, contrast, dynamics, discrimination, threshold

DOI: 10.3724/SP.J.1206.2012.00551

*This work was supported by grants from Hi-Tech Research and Development Program of China (2007AA02Z313), The National Natural Science Foundation of China (30623004, 30870831), and The Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (KSCX1-YW-R-32).

**Corresponding author.

Tel: 86-10-64888453, E-mail: yiwang@ibp.ac.cn

Received: November 9, 2012 Accepted: December 4, 2012