遮挡范式下运动速度和方向对碰撞时间估计绩效指标的影响*

田 雨[1,2] 王笃明[3] 江 京[1] 王琦君[3] 王春慧**[1]
（[1]中国航天员科研训练中心人因工程重点实验室，北京，100094）（[2]北京大学心理与认知科学学院，北京，100871）
（[3]浙江理工大学心理系，杭州，310018）

摘 要 为探索运动速度和方向对碰撞时间（TTC）估计的影响，采用3运动速度×4运动方向的双因素设计开展了实验研究。结果发现，被试相对慢速条件下的TTC估计的准确性显著差于相对中速和相对快速条件；相对慢速条件下，被试对竖直方向的TTC估计准确度显著差于水平方向、低估TTC的比例显著高于高估TTC的比例。结果表明，运动速度对TTC估计绩效指标的影响相对较强，运动方向对其影响相对较弱；两个因素的影响存在交互作用。

关键词 遮挡范式 运动速度 运动方向 碰撞时间估计

1 引言

运动知觉（motion perception）是个体处理物体空间位移信息的知觉（于晓雅, 2008），是个体重要的环境适应生存能力之一。估计运动物体的碰撞时间（time to contact，TTC）是一种典型的运动知觉，人们经常要利用感觉器官接收到的时间与空间信息来估计运动物体到达某一地点所需要的时间（郭秀艳, 贡晔, 薛庆国, 袁小芸, 2000; 黄端, 张侃, 2008; 陶维东, 陶晓丽, 孙弘进, 2011）。TTC估计反映了人的时空信息综合处理能力（Chang & Jazayeri, 2018）。TTC估计的准确性直接影响着个体对环境的适应以及诸多感知运动任务的表现，如以往研究报道显示，驾驶员事故频率、运动员的技能表现、海员的作业表现、操作者手控交会对接控制绩效等均与TTC估计准确性存在关联（江楠楠, 许朝晖, 余浩, 赵红旗, 2006; 李小华, 何存道, 彭楚翘, 郭伟力, 1997; 李欣, 王斌, 马红宇, 于立贤, 2007; 田雨, 陈善广, 王春慧, 田志强, 蒋婷, 2013）。

测量TTC估计特性的一个经典范式为遮挡范式，该范式中运动物体在初始运动时是可视的，物体按一定规律运动到一个遮挡物后，观察者需想象物体按同样的规律进行运动，并判断运动物体到达某一特定目标点所需要的时间，即碰撞时间（黄端, 张侃, 2008）。另一种常用的TTC估计范式是拦截范式，在该范式中，运动刺激往往包含变化的深度信息，运动物体有些情况下是一直可视的、有些情况下是运动一段后被遮挡的，观察者需要估计TTC，并适时通过伸手等操作来进行物体截取（La Scaleia, Zago, & Lacquaniti, 2015; Russo et al., 2017）。

在包含深度信息线索、物体朝向观察者运动的拦截任务中，已有研究表明人可以利用tau信息直接估计TTC从而指导拦截行为，这里的tau是物体视觉大小（如视角）与该大小的瞬时变化的比值（Lee, 2009）。然而有研究指出遮挡范式与拦截范式利用的信息有所不同（Tresilian, 1995）；根据双视觉系统理论（Goodale & Milner, 1992），遮挡范式更多地依赖人脑中知觉相关的视觉系统（vision for perception），而拦截范式更多地依赖人脑中运动相关的视觉系统（vision for action）。特别是遮挡范式中，当运动物体尺寸较小且在二维平面运动时，运动物体在视网膜的扩张（local tau）不再明显；虽然Lee

* 本研究得到人因工程重点实验室基金（SYFD170051802、614222204020617）、载人航天第四批预先研究基金项目（030602）和国家重点研发计划课题（2017YFB1300305）的资助。

** 通讯作者：王春慧。E-mail: chunhui_89@163.com

DOI:10.16719/j.cnki.1671-6981.20180403

等人提出的 Global tau 理论可解释一部分实验结果，然而有研究认为运动物体大小、速度和释放距离等因素对 TTC 估计也有明显影响（唐日新 , 张智君 , 刘玉丽 , 赵亚军 , 2010; 王向博 , 丁锦红 , 2011 ）。综上，观察者在对 TTC 进行估计时可能是综合利用了视觉 tau 线索以及物体大小、速度、距离等运动物体刺激特征。已有研究显示运动速度可能是影响 TTC 估计的一个重要刺激特征因素（郭秀艳等 , 2000; 黄端 , 张侃 , 2008; 唐日新等 , 2010 ）。

围绕物体运动速度对 TTC 估计的影响，现有研究较为一致地发现速度的增加会使 TTC 估计更加准确（郭秀艳等 , 2000; 唐日新等 , 2010; Kiefer, Flannagan, & Jerome, 2006 ）。然而上述研究主要使用绝对时间偏差作为 TTC 估计准确度的绩效指标，该指标并不能全面地反映 TTC 估计的准确性（邱博宇 , 2015 ），使用待估时间对绝对时间偏差进行归一化得到的偏差率等指标可能是更加系统地衡量 TTC 估计准确性的有效指标。

研究还发现，重力因素及运动方向对运动物体 TTC 估计特征也有显著影响：在正常重力条件下，人脑中建立的重力内模型会导致对竖直向上方向和竖直向下方向运动物体的 TTC 估计及拦截行为产生差异，对从上往下运动物体拦截行为触发时间往往要比从下往上要早（Senot, Zago, Lacquaniti, & McIntyre, 2005; Senot et al., 2012 ）。在轨飞行初期，身处微重力环境的航天员仍然表现出这种特征（McIntyre, Zago, Berthoz, & Lacquaniti, 2001 ），显示人脑中的重力内模型在微重力环境下仍在起作用。这些研究提示运动方向对 TTC 估计也可能存在影响。然而在以往使用遮挡范式开展的研究中，大多数研究或者仅关注了水平方向的运动，或者仅关注了竖直方向的运动，对于竖直方向和水平方向的 TTC 估计特性是否存在差异这一问题缺乏明确的报道。

针对以往使用遮挡范式和二维平面运动刺激所开展的 TTC 估计研究中存在的以上问题，本研究设计了 3 速度（相对慢速、相对中速、相对快速）× 4 方向（竖直向上、竖直向下、水平向左、水平向右）的 TTC 估计实验，选取了时间估计偏差率绝对值、偏差率以及准确估计待估时间、高估待估时间、低估待估时间的比例等绩效指标进行分析，以期更为系统地研究和分析运动速度、运动方向对 TTC 估计绩效指标的影响。

2　方法

2.1　实验任务与程序

研究依据遮挡范式开发了 TTC 估计测试软件。程序开始时呈现红色小球和灰色圆形遮挡物于屏幕中（如图 1 所示）。小球初始位置可出现在中心点的上方、下方、左方或右方；被试按特定按键后小球开始向中心运动，当运动到灰色遮挡物区域时，小球被遮蔽住，被试判断小球达到目标中心点时按手柄上相应键；程序自动计算和记录小球从进入遮挡区域至到达中心点实际所需时间（actual TTC，记为 TTCa）和被试从小球进入遮挡区到按键的时间（estimated TTC，记为 TTCe ）等数据。小球运动速度、运动方向、起点距离中心原点的距离、遮挡物半径、小球半径等参数可在配置文件中设定。在刺激呈现时，程序对小球运动速度与方向进行随机和平衡。



(a)　(b)

（a）测试初始界面；（b）被试按键反应后的反馈界面

图 1　程序界面

2.2　被试

参与本实验的被试共 34 名，其中男性 30 名，年龄 24.6 ± 2.0 岁，所有被试视力或者矫正视力正常。每名被试都阅读了《知情同意书》，并签字同意。

2.3　实验设计

实验采用 3 × 4 双因素被试内实验设计，自变量为目标物体运动速度（相对慢速、相对中速、相对快速）和运动方向（竖直向上、竖直向下、水平向左、水平向右），因变量包括：

TTC 估计偏差率的绝对值（Absolute Deviation Rate，记为 ADR，ADR = |（TTCe-TTCa）/TTCa|），其取值范围为 0 到 1。

TTC 估计的偏差率（Deviation Rate，记为 DR ），DR =（TTCe-TTCa）/TTCa，DR 的取值范围为 -1 到 1。

准确估计 TTCa、高估 TTCa、低估 TTCa 的比例。对于某一试次，当 DR > .05 时，定义为对 TTCa 的一次高估；当 DR < -.05 时，定义为对 TTCa 的一次低估；当 DR 在 -.05 到 .05 之间时定义为对 TTCa 的一次准确估计。由此可计算 TTCa 低估比例

（underestimate rate，记为UR）、高估比例（overestimate rate，记为OR）和准确估计比例（hit rate，记为HR）。

测试配置如下：小球起始点距离中心的距离为350像素点，遮挡物半径为180像素点。运动速度为相对慢速（50像素点/s，若以视角为单位约为0.85°/s）、相对中速（100像素点/s，约为1.70°/s）、相对快速（150像素点/s，约为2.55°/s），对应的待估时距分别为3.6s、1.8s、1.2s。运动方向包含竖直向上、竖直向下、水平向左、水平向右；每个方向每个速度重复3次。

2.4 实验仪器与装置

实验刺激通过Thinkpad x201s笔记本电脑呈现，显示分辨率为1440 × 900，被试通过莱仕达PXN-8100手柄进行按键反应。被试与屏幕距离约60cm。

2.5 实验流程

每名被试练习1轮、测试5轮，每轮测试包含72个试次。由此获得了每名被试共360个试次的数据，即12个速度方向条件组合、每个条件组合下30次反应数据。

2.6 统计分析方法

使用双因素重复度量方差分析检验速度和方向的主效应及交互作用，简单效应分析采用了Bonferroni校正。在对特定速度条件下被试时间高估比例与时间低估比例进行比较时采用了配对样本t检验。

3 结果与分析

3.1 数据预处理

对原始数据进行如下预处理：以每名被试每个速度-方向条件组合的30个偏差率绝对值数据为数据单元，剔除取值在“均值 ± 3倍标准差”范围之外的数据所在的试次。所剔除的试次占全部试次的1.08%。

3.2 运动速度和方向对偏差率绝对值的影响

偏差率绝对值（ADR）这一指标重点考察被试速度时间估计的准确度。各个速度和方向组合下被试ADR指标如图2，双因素重复测量方差分析发现：

运动速度的主效应显著（Mauchly球形度检验 $p < .01$，使用Greenhouse-Geisser矫正值，$F(1, 51) = 4.408$，$p = .025$，$\eta^2 = .118$）。速度为50、100、150像素点/s时ADR分别为.141 ± .008、.127 ± .005、.130 ± .005（均值 ± 标准误，下同）。速度为50像素点/s时的ADR与两个相对更快的速度时ADR的差异临界显著（p值分别为.083、.077），速度为100像素点/s时的ADR和速度为150像素点/s时的ADR无显著差异（$p = 1.000$）。

运动方向主效应不显著（$F(3, 99) = .779$，$p = .508$，$\eta^2 = .023$）。

速度和方向的交互效应显著（$F(6, 198) = 3.106$，$p = .006$，$\eta^2 = .086$），简单效应分析显示：在速度为50像素点/s时，水平向左运动的ADR（.133 ± .008）显著低于竖直向上运动的ADR（.147 ± .009）（$p = .044$），临界显著低于竖直向下方向的ADR（.146 ± .008）（$p = .055$）。

3.3 运动速度和方向对偏差率指标的影响

偏差率（DR）这一指标重点考察被试在进行TTC估计时有无系统性地高估或低估TTCa的趋势及程度。各个速度和方向组合下被试DR指标如图3，双因素重复测量方差分析发现：

运动速度的主效应显著（Mauchly球形度检验 $p < .001$，使用Greenhouse-Geisser矫正值，$F(1, 4) = 47.157$，$p < .001$，$\eta^2 = .588$）。被试在50、100、

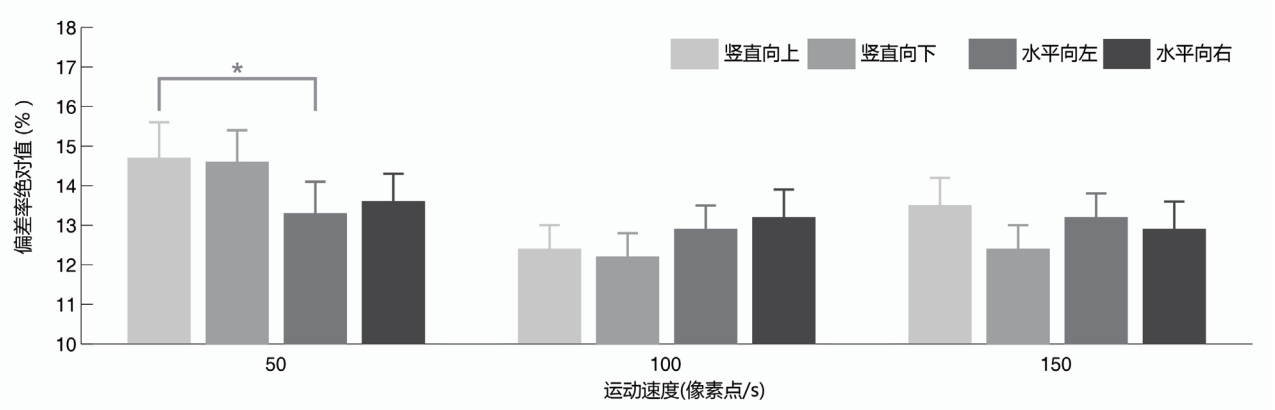


图2 各个速度和方向组合下被试偏差率绝对值均值（误差棒表示标准误）
注：$^*p < .05$

150 像素点 /s 三个运动速度下的 DR 分别为 -.091 ± .010，.011 ± .005，.002 ± .007。速度为 50 像素点 /s 时的 DR 与两个相对更快速度水平的 DR 差异显著（p 值均小于 .001），速度为 100 像素点 /s 时的 DR 和速度为 150 像素点 /s 时的 DR 无显著差异（p = .695）。

运动方向主效应显著（$F(3, 99) = 3.733$，p = .014，η^2 = .102）。被试在竖直向上、竖直向下、水平向左、水平向右运动方向的 DR 分别为 -.035 ± .006，-.035 ± .005，-.019 ± .007，-.016 ± .007。仅水平向右运动方向的 DR 与两个竖直方向（竖直向上、竖直向下运动方向）DR 的差异达到了临界显著的水平（p 值分别为 .084、.095）。

速度和方向的交互效应显著（$F(6, 198) = 2.426$，p = .028，η^2 = .068），简单效应分析显示，在速度为 50 像素点 /s 时，竖直向上运动方向的 DR（-.104 ± .012）显著低于水平向右运动方向的 DR（-.083 ± .011）（p = .049）；在速度为 100 像素点 /s 时，竖直向上运动方向的 DR（-.006 ± .008）、竖直向下方向的 DR 率（-.004 ± .006）显著低于水平向右运动方向的 DR（.032 ± .010）（p 值分别为 .049、.017）。

3.4　运动速度和方向对低估时间比例、击中比例、高估时间比例的影响

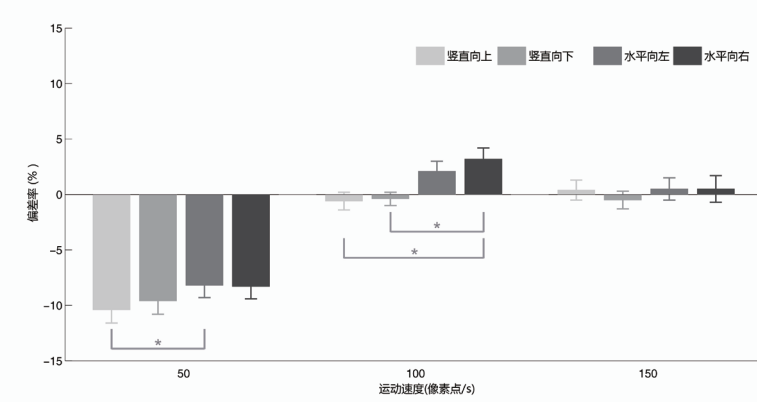


图 3 各个速度和方向组合下被试偏差率均值（误差棒表示标准误）

注：$^*p < .05$

低估 TTCa 的比例（UR）、准确估计 TTCa 的比例（HR）、高估 TTCa 的比例（OR）能直观地反映被试进行 TTC 估计时是否有系统性的偏差。统计检验和分析发现，运动速度对 HR、UR、OR 的影响均显著（Mauchly 球形度检验 p 值均 < .05，使用 Greenhouse-Geisser 矫正值，对于 UR，$F(1, 45)$ = 57.381，p = .000，η^2 = .635；对于 HR，$F(1, 55)$ = 8.042，p = .002，η^2 = .196；对于 OR，$F(1, 53)$ = 41.992，p = .000，η^2 = .560），运动方向对 HR、UR、OR 的影响均不显著（对于 UR，$F(3, 99) = 2.125$，p = .102，η^2 = .061；对于 HR，$F(3, 99)$ = .273，p = .845，η^2 = .008；对于 OR，$F(3, 99) = 2.104$，p = .105，η^2 = .060）。简单效应分析显示，不同速度条件下指标的显著差异主要出现在相对慢速与相对更快的两个速度水平之间，相对中速和相对快速之间在上述三个指标上均不存在显著差异（如图 4 所示）。

在相对慢速条件下，被试提前按键反应的比例为 61.4%，显著高于延后按键反应的比例 17.2%（配对样本 t 检验，$t(33) = 10.733$，$p < .001$）；相对中速条件下，被试提前按键反应的比例为 38.0%，与延后按键反应的比例 36.1% 较为接近，两者无显著差异（配对样本 t 检验，$t(33)$ = .675，p = .504）；相对快速条件下，被试提前按键反应的比例为 40.2%，与延后按键反应的比例 34.9% 较为接近，两者无显著差异（配对样本 t 检验，$t(33) = 1.612$，p = .117）。这些结果提示相对慢速条件下被试高估运动速度、低估待估时间的系统偏差最明显，而相对中速和相对快速条件下，则不存在这种系统偏差或系统偏差相对较小。

4　讨论

4.1　运动速度对碰撞时间估计绩效指标的影响

本研究发现在相对慢速条件下（速度为 50 像素点 /s，待估时间为 3.6s），被试表现出非常明显的低估待估时间（即高估速度，提前按键反应）的倾

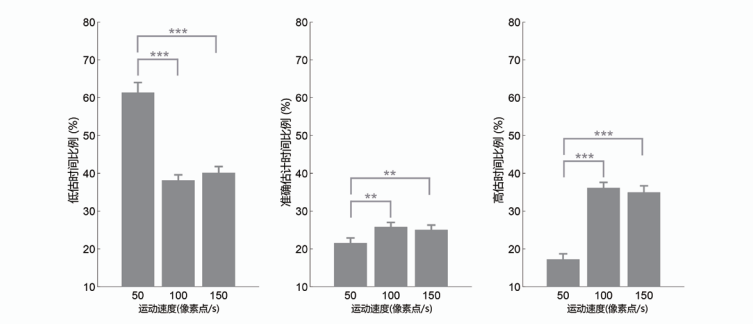


图 4 各速度条件下被试低估、准确估计、高估时间的比例（误差棒表示标准误）

注：$^{**}p < .01$，$^{***}p < .001$

向（低估待估时间的比例达到了 61.4%、偏差率平均值为 -.091）；而在相对中速和相对快速条件下（速度分别为 100 像素点 /s、150 像素点 /s，待估时间分别为 1.8s、1.2s），被试则没有表现出很强的系统性低估待估时间或高估待估时间的倾向（低估待估时间的比例分别为 38.0%、40.2%，偏差率平均值分别为 .011、.002）。本研究所发现的相对慢速条件下被试低估待估时间（高估速度）的规律与前人研究发现较为一致（唐日新等 , 2010）。前人研究发现，随着速度增加被试高估待估时间（低估速度）的次数会增加（李小华等 , 1997; 唐日新等 , 2010），这与本研究发现部分一致：从相对慢速条件到相对中速条件，高估待估时间的次数和比例增加了；然而从相对中速条件到相对快速条件（待估时间从 1.8s 变化为 1.2s），高估待估时间的次数和比例并未继续显著增加。本研究中三个待估时间水平（3.6s、1.8s、1.2s 的选取）参考了以往的文献报道，如有文献认为 1.5s 到 2s 之间是 TTC 范式中高低估反转的待估时间阈值（Rolin, 2017），基于本研究的实验结果我们推断高低估反转的待估时间阈值更可能在 1.8s 以上。同时应注意到本文中可视距离（170 像素点）和遮挡距离（180 像素点）长度上比较接近；文献显示在这种条件下，在运动信息之外，人会更好地利用时距（time interval）信息来进行 TTC 估计（Chang & Jazayeri, 2018）；而 1.2s 和 1.8s 这两个时距范围很可能正好在人能较为准确地感知和保持的时距范围，因此在这两个条件下被试 TTC 估计的准确性均较高，这可能是本研究相对快速条件与相对中速两个条件下高估待估时间比例无显著差异的原因。

本研究发现，相对慢速条件下碰撞时间估计的准确性（偏差率绝对值为 .141 ± .008，准确估计 TTCa 的比例为 21.5 ± 1.4 %）显著低于两个相对更快的速度条件（偏差率绝对值分别为 .127 ± .005、.130 ± .005，准确估计 TTCa 的比例为分别为 25.8 ± 1.2 %、25.0 ± 1.3 %）。由于相对慢速条件下，待估时间较长，而绝对偏差时间等于待估时间乘以偏差率绝对值，因此本文虽然没有分析绝对偏差时间，但可以推断，相对慢速条件下的绝对时间偏差也显著地高于两个相对更快的速度条件，这与前人的研究报道中的数据规律较为一致（李小华等 , 1997; 唐日新等 , 2010）。本研究在以往研究的基础上更进一步地证明，随着速度的增加和待估时间的缩短，不仅绝对偏差时间指标显著下降，而且时间估计偏差率绝对值（通过待估时间归一化后的指标）也有显著下降的趋势。在相对中速和相对快速条件下（待估时间分别为 1.2s 和 1.8s），时间估计偏差率绝对值未表现出显著差异，这提示以偏差率绝对值衡量的碰撞时间估计准确性的提升存在瓶颈，在达到一定瓶颈后继续提高速度和降低待估时间，准确性并不会继续提升。

4.2 运动方向对碰撞时间估计绩效指标的影响

本研究设置了竖直向上、竖直向下、水平向左、水平向右四个运动方向水平，所有方向的运动均为匀速运动。研究数据显示，相对于运动速度对碰撞时间估计绩效指标的影响，运动方向对各类绩效指标的影响都较为微弱。但数据也展示出一些规律和趋势：首先，竖直向上运动方向与竖直向下运动方向两个条件在本研究所考察的所有绩效指标上均无显著差异；水平向左运动方向与水平向右运动方向两个条件在本研究所考察的所有绩效指标上也均无显著差异。其次，竖直方向运动与水平方向运动在某些条件下展现出了显著差异，具体表现为在慢速运动条件下（速度为 50 像素点 /s, 待估时间为 3.6s），相对于水平方向（水平向左或水平向右）运动，被试对竖直方向（竖直向上或竖直向下）运动 TTC 估计的准确性更差、低估 TTC 的系统偏差更大。

本研究发现水平向左运动方向与水平向右运动方向两个条件在所考察的所有绩效指标上均无显著差异，这与已有文献报道基本一致（黄端，张侃，2008）。然而，本研究结果显示竖直向上与竖直向下两个运动方向的 TTC 判断也没有显著差异，这与 Senot 等人的结论不一致（Senot et al., 2005, 2012）。通过比较分析，这种不一致很可能源自实验任务的差异，Senot 等人的实验使用沉浸式的三维头盔显示、采取的是拦截范式、物体运动有匀速也有变速，而本研究使用的是非沉浸式的计算机平面显示器呈现刺激、采取的是遮挡范式、物体运动均为匀速运动。Senot 等人分析认为在其实验中被试使用了包含重力效应的内模型（internal model）；而在本研究实验中，我们推断被试的内模型并没有被触发，被试主要依靠从外部感知的视觉信息及时间间隔信息来进行碰撞时间估计。

本研究发现在慢速运动条件下（速度为 50 像素点 /s，待估时间为 3.6s），相对于水平方向（水平向左或水平向右）运动，对竖直方向（竖直向上或竖直向下）运动，被试 TTC 估计的准确性更差（ADR 指标之差显著大于 0）、倾向于更早进行按键反应（DR 指标之差显著小于 0）。这种方向效应可能反映了眼球生理解剖结构的影响，即在重力条件下，眼球水平运动易于竖直方向运动（刘燕瑛，2013）；眼动研究也显示眼球水平追踪比垂直追踪更加平滑、更加精确（丁锦红，林仲贤，2001）。在中速运动条件下（速度为 100 像素点 /s，待估时间为 1.8s），虽然水平和竖直两类运动被试 TTC 估计的整体准确性（ADR）并无显著差异，但相对于水平方向运动，被试对竖直方向运动的 TTC 进行估计时倾向于更早进行按键反应（竖直、水平方向 DR 指标之差显著小于 0）。之所以出现 ADR 和 DR 两指标的这种不一致，很可能是因为这两个指标虽然存在关联，但在内涵上又是存在显著差异的，DR 更能反映是否出现系统性提前或延后反应的趋势及程度，而 ADR 则主要反映 TTC 估计的准确程度。如果将竖直向上、竖直向下合并为竖直方向，将水平向左、水平向右合并为水平方向，进行 2（方向）×3（速度）的方差分析，也会出现类似情形，以 ADR 为指标，竖直方向的 TTC 估计受运动速度影响较大，而水平方向不受影响；以 DR 为指标，竖直和水平方向的 TTC 估计都受运动速度调节。以往 TTC 范式中对偏差率绝对值指标关注较多，本研究发现提示我们，除了偏差率绝对值指标，对带有方向性的偏差率指标应进行更多关注。

5　结论

在本实验选取的因素水平下，运动速度对 TTC 估计绩效指标的影响相对较强，运动方向对 TTC 估计绩效指标影响相对较弱；运动速度和运动方向两个因素对 TTC 估计绩效指标的影响存在交互作用。被试在相对慢速运动条件下表现出明显的低估待估时间的系统偏差，该条件下 TTC 估计的准确性显著差于相对中速和相对快速条件。在相对慢速运动条件下，被试对竖直方向运动的 TTC 估计偏差率显著大于其对水平方向运动的 TTC 估计偏差率。

参考文献

丁锦红，林仲贤 . (2001). 不同方向视觉运动追踪的特性 . *心理学报，33(4),* 289–293.

郭秀艳，贡晔，薛庆国，袁小芸 . (2000). 遮挡范式下对碰撞时间的估计 . *心理科学，23(1),* 34–37.

黄端，张侃 . (2008). 碰撞时间估计的影响因素研究 . *心理科学，31(6),* 1284–1286.

江楠楠，许朝晖，余浩，赵红旗 . (2006). 海员的速度估计研究 . *中华航海医学与高气压医学杂志，13(1),* 18–20.

李小华，何存道，彭楚翘，郭伟力 . (1997). 卡车驾驶员速度估计研究 . *心理科学，20(6),* 525–529.

李欣，王斌，马红宇，于立贤 . (2007). 我国马术运动员速度感测评研究 . *天津体育学院学报，22(4),* 307–309.

刘燕瑛 . (2013). *横竖错觉机制的眼动研究* . 华东师范大学硕士学位论文 .

邱博宇 . (2015). 遮挡范式下速度对碰撞位置估计的影响 . *心理学进展，5(5),* 291–295.

唐日新，张智君，刘玉丽，赵亚军 . (2010). 伸手拦截启动中的信息利用 . *心理学报，42(4),* 507–517.

陶维东，陶晓丽，孙弘进 . (2011). 即将碰撞时间的视觉信息加工研究进展 . *现代生物医学进展，11(6),* 1165–1169.

田雨，陈善广，王春慧，田志强，蒋婷 . (2013). 速度知觉测试软件的开发与应用 . *计算机工程与设计，34(1),* 372–376.

王向博，丁锦红 . (2011). 平滑追踪眼动及其对运动物体时空特征表征和预测的影响 . *心理科学进展，19(5),* 682–691.

于晓雅 . (2008). 视觉运动知觉脑机制研究现状 . *北京教育学院学报（自然科学版），3(5),* 4–10.

Chang, C. J., & Jazayeri, M. (2018). Integration of speed and time for estimating time to contact. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 115(12),* E2879–E2887.

Goodale, M. A., & Milner, A. D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neurosciences, 15(1),* 20–25.

Kiefer, R. J., Flannagan, C. A., & Jerome, C. J. (2006). Time-to-collision judgments under realistic driving conditions. *Human Factors, 48(2),* 334–345.

La Scaleia, B., Zago, M., & Lacquaniti, F. (2015). Hand interception of occluded motion in humans: A test of model-based vs. on-line control. *Journal of Neurophysiology, 114(3),* 1577–1592.

Lee, D. N. (2009). General Tau Theory: Evolution to date. *Perception, 38(6),* 837–858.

McIntyre, J., Zago, M., Berthoz, A., & Lacquaniti, F. (2001). Does the brain model Newton's laws? *Nature Neuroscience, 4(7),* 693–694.

Rolin, R. A. (2017). *Perception of motion in virtual reality interception tasks.* Master's Thesis of the University of British Columbia.

Russo, M., Cesqui, B., La Scaleia, B., Ceccarelli, F., Maselli, A., Moscatelli, A., et al. (2017). Intercepting virtual balls approaching under different gravity conditions: Evidence for spatial prediction. *Journal of Neurophysiology, 118(4),* 2421–2434.

Senot, P., Zago, M., Lacquaniti, F., & McIntyre, J. (2005). Anticipating the effects of gravity when intercepting moving objects: Differentiating up and down based on nonvisual cues. *Journal of Neurophysiology, 94(6),* 4471–4480.

Senot, P., Zago, M., Le S é ac'h, A., Zaoui, M., Berthoz, A., Lacquaniti, F., & McIntyre, J. (2012). When up is down in 0g: How gravity sensing affects the timing of interceptive actions. *Journal of Neuroscience, 32(6),* 1969–1973.

Tresilian, J. R. (1995). Perceptual and cognitive processes in time–to–contact estimation: Analysis of prediction–motion and relative judgment tasks. *Perception and Psychophysics, 57(2),* 231–245.

Impact of Speed and Direction of Motion on Human Performance in Time to Contact Estimation

Tian Yu[1,2], *Wang Duming*[3], *Jiang Jing*[1], *Wang Qijun*[3], *WangChunhui*[1]

([1]National Key Laboratory of Human Factors Engineering, China Astronaut Research and Training Center, Beijing, 100094) ([2]School of Psychological and Cognitive Sciences, Peking University, Beijing, 100871) ([3]Department of Psychology, Zhejiang Science & Technology University, Hangzhou, 310018)

Abstract This study aimed to explore the impact of speed of motion and direction of motion on human performance in time to contact (TTC) estimation. Based on the occlusion paradigm, a testing software of TTC estimation was developed, in which a ball first appeared at a peripheral position of the computer screen, and then moved with a constant speed toward the center of the screen, which was marked by a small red cycle whose diameter was the same as the moving ball. The ball was visible at first, after moving for a period, it entered a dark circle and became invisible. The participant had to imagine the motion of the ball under the dark circle, and judge when it would reach the center of the screen, and press a key to indicate the judgment. The visible distance, the occlusion distance (radius of the dark circle), the speed of motion, the direction of motion could all be configured in the testing software. 34 participants, aged between 21 and 30 years, volunteered to complete the TTC estimation experiment. The experiment used a 3-level speeds of motion (relatively slow, relatively medium, and relatively fast, being 50pixels/s, 100pixels/s, 150pixels/s, or 0.85°/s, 1.70°/s, 2.55°/s, respectively) × 4-level directions of motion (upward, downward, leftward, and rightward) design. The visible distance, the occlusion distance were kept constant during the experiment, being 170 pixels and 180 pixels, respectively. The four directions might also be categorized into two directions in the analyses: the vertical direction and the horizontal direction, when no significant difference was found between the upward motion and the downward motion, and between the leftward motion and the rightward motion.

Performance indices such as deviation rate, absolute deviation rate, underestimate rate, overestimate rate and hit rate in TTC estimation were analyzed. Deviation rate (DR) was defined as (TTCe-TTCa)/TTCa, where TTCa (short for actual time to contact) was the time interval for the ball to move from the edge of the dark circle to the center of that circle, it was the value of occlusion distance divided by speed; TTCe (short for estimated time to contact) meant the time interval from the time when the ball first entered the dark circle to the time when the participant pressed the key to indicate his estimation. Absolute deviation rate (ADR) was defined as |(TTCe-TTCa)|/TTCa. When DR was between -0.05 and 0.05 for a trial, the estimation was defined as a hit; when DR was higher than 0.05, it was defined an overestimate of TTC; when DR was lower than -0.05, it was defined an underestimate of TTC. Hence, the hit rate, overestimate rate and underestimate rate could be calculated.

Results showed that the accuracy of TTC estimation, indicated by the absolute deviation rate, was significantly lower in the relatively slow speed condition compared to that in the two faster conditions. In the relatively slow speed condition, the absolute deviation rate of the participants in TTC estimation of the vertical motion was significantly greater than that of the horizontal motion; meanwhile, the underestimation rate of TTC was significantly higher than that of the overestimation rate. In the two faster speed conditions, no significant differences were found in the absolute deviation rate between vertical and horizontal motion; no significant differences were found between participants' underestimation rate of TTC and overestimation rate of TTC.

Those results suggested that in the settings of the current experiment, the impact of speed of motion on performance indices of TTC estimation was relatively strong, while the impact of direction of motion was relatively weak. Meanwhile, the impact of speed of motion and direction of motion showed significant interactions.

Key words occlusion paradigm, speed of motion, direction of motion, time to contact