

指导教师： 杨涛

提交时间： 2016/03/11

# CVPR2015 Paper

## Translation

No: 01

姓名： 齐云轩

学号： 2013302527

班号： 10011303 班



## 基于图像强度的接触时间

Yukitoshi Watanabe Fumihiko Sakaue Jun Sato  
Nagoya Institute of Technology  
Gokiso, Showa, Nagoya, 466-8555, Japan  
[yukitoshi@cv.nitech.ac.jp](mailto:yukitoshi@cv.nitech.ac.jp), [sakaue@nitech.ac.jp](mailto:sakaue@nitech.ac.jp), [junsato@nitech.ac.jp](mailto:junsato@nitech.ac.jp)

### 绪论

众所周知，仅根据照相机中的图像尺度的变化，我们就能够估算出面向对象的接触时间 (*time-to-contact*)。而我们不需要任何其他信息，比如相机的参数和相机的运动状态。然而，已有用来测量接触时间的方法是基于图像的几何特点，例如角和边，因此它们不能在图像没有几何特点时使用。在本文中，我们提出一种新的方法来根据图形的几何信息计算接触时间。当一个光源在 3D 场景中移动时，观察强度根据光源的运动而改变。在本文中，我们分析图像的几何信息的改变情况，并揭示接触时间能够根据图像的强度的变化而估算。我们的方法不需要任何附加信息，比如光源的辐射亮度，对象的反射和对象表面的方向等。这个方法会有多种应用，比如车辆驾驶员的辅助。

### 1. 简介

接触时间对测量对象碰撞的危险程度是很有用的[3]，而且已经被广泛地学习[1][2][4][6][7][8][9]。它在照相机的参数和场景的结构固定时是不变的，所以我们不需要知道照相机参数和场景的结构就能计算接触时间。

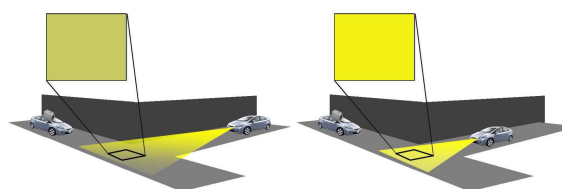
接触时间已经成为了我们所学习的图像的差分 (*differential*) 几何属性，而对象的外形尺寸的改变或图像的光流场 (*optic flow field*) 也已经用来估算接触时间了[7][10]。例如，Cipolla et al.[1]提出了一种根据图像的闭合的轮廓线 (*contour*) 围成的区域的变化来计算接触时间的方法。然而，这些方法需要额外的几何信息，比如角，闭合轮廓线等等。为解决这个问题，Horn et al.[4]提出了一种根据图像亮度来估算接触时间的方法。然而，他们的方法是基于恒定光源假设，所以一旦假设不成立，方法就会失效。比如，如果光源在三维环境中移动，他们的方法就完全不能使用。

在本文中，我们提出了一种根据图像强度来计算接触时间的方法。我们的方法与传统方法大为不同，它能够测量移动中的光源的接触时间。众所周知，被光源照亮的表面的明亮程度随光源的运动而改变。比如，车灯光照下的路面上的明亮程度随汽车的运动而改变，如图 1 所示。与光源的距离变小时，明亮程度变高。所以，如果光源的辐射亮度精确地估算这些参数仍有很大困难。所以，我们在这篇论文中提出了一种根据图像强度来估算接触时间的方法，而无需知道其

他的那些参数。

## 2. 基于几何信息的接触时间

我们首先考虑根据几何信息估算接触时间的传统方法[1][8]。



(a) 远光 (b) 近光  
图 1. 光源距离变化引起的强度变化。近光下的观察强度比远光下的大。

让我们考虑这样一个照相机，它朝着一个物体匀速移动。同时，物体在图像的外形尺寸中随物体与照相机之间的距离变化而变化。令物体的外形大小在  $t$  时刻是  $y$ ，在  $t+1$  时刻变为  $y'$ 。如果物体的实际大小是  $Y$ ，物体与照相机之间的距离从  $t$  时刻的  $Z$  变为  $t+1$  时刻的  $Z'$ ，图像的大小  $y$  和  $y'$  可表示如下：

$$y = f \frac{Y}{Z} \quad (1)$$

$$y' = f \frac{Y}{Z'} \quad (2)$$

这里， $f$  是相机的焦距。然后，接触时间可以用距离  $Z$  和  $Z'$  表示如下：

$$TC = \frac{Z'}{Z - Z'} \quad (3)$$

从式(1)，式(2)和式(3)中，我们发现可以仅凭物体在图像中尺寸的变化来计算接触时间，公式如下：

$$TC = \frac{y'}{y - y'} \quad (4)$$

这个等式不含焦距，物体的实际大小和以及物体与相机间的距离。所以，我们仅凭图像的几何信息来估算接触时间。

这个方法很实用，因为无需照相机的标定参数，如焦距，主点等。然而，该方法在没有获得图像的几何信息时不能使用。比如，我们通常不能从夜景照片中获得足够的几何信息。为应对此问题，我们提出一种新颖的方法来计算接触时间。在此方法中，我们根据光度信息来计算接触时间，而非几何信息。

## 3. 基于（图像）强度的接触时间

### 3.1 反射模型

让我们来根据光度信息推导接触时间。为此，我们首先考虑这个观察强度的光反射模型。在这篇论文里，我们就设定此表面是朗伯体 (Lambertian)。

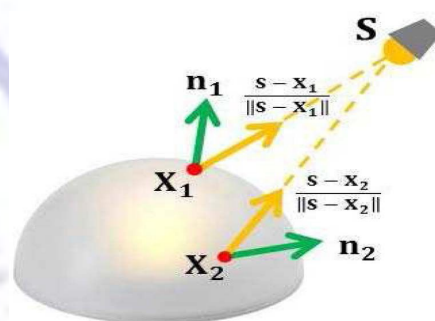


图 2. 观察点  $X$  和光源  $S$  之间的关系

让我们考虑光源与场景如图 2 所示的情况。在这种情况下，观察强度  $i$  可通过光源的位置  $S$ ，表面的法线  $n$  和观察点  $X$  表示如下：

$$i = \frac{1}{\|S - X\|^2} E \rho \frac{\max(\mathbf{n}^T(S-X), 0)}{\|S - X\|} \quad (5)$$

这里,  $E$  和  $\rho$  分别代表光源的辐射亮度和表面的反射。如果没有负强度 (*negative intensity*) 存在, 式(5)可以写作:

$$i = \frac{1}{\|S - X\|^2} E \rho \frac{\mathbf{n}^T(S-X)}{\|S - X\|} \quad (6)$$

式(6)中,  $\frac{S - X}{\|S - X\|}$  描述  $X$  点处光源的方向, 而  $\frac{1}{\|S - X\|^2}$  代表光随距离增大而产生的减弱 (*attenuation*)。从式(6)中, 我们看到, 观察强度与光源与观察点的间距的平方成反比, 而观察强度强烈地依赖于到光源的距离。

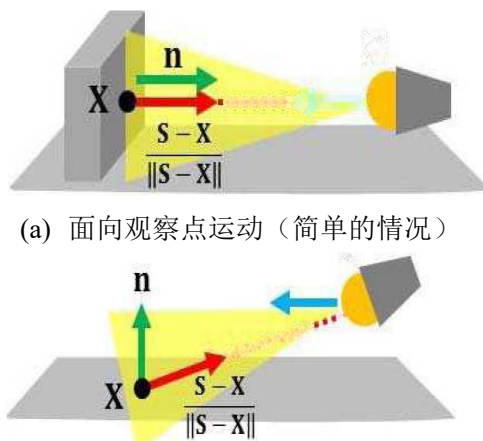
通过使用这个特性, *Liao et al.*[5] 提出了一个通过观察强度来估算三维尺寸的方法。不同于此, 我们在本文中提出了通过观察强度而无需准确复原三维尺寸来估算接触时间的方法。在下面的部分, 我们将分析强度模型并推导一个用以估算向物体移动的光源的接触时间的方法。

### 3.2 基于强度的接触时间

在这部分, 我们提出一种根据图像强度来估算接触时间的方法。我们首先考虑这种情况, 光源朝观察点  $X$  运动, 如图 3 所示。在这种情况下, 在光源移动的过程中, 表面的法线  $n$  和光源的方向  $\frac{S - X}{\|S - X\|}$  的夹角是恒定

的。我们接下来归纳问题并考虑当光源不朝观察点  $X$  移动的情况。在该情

况中, 表面法线  $n$  和光源方向  $\frac{S - X}{\|S - X\|}$  的夹角随着光源的运动而改变。



(a) 面向观察点运动 (简单的情况)

(b) 面向非观察点运动 (复杂的情况)

图 3. 两种不同的情况来估算接触时间。在情况(a)中, 光源  $S$  向观察点  $X$  运动。在情况 B 中, 光源运动方向不朝观察点。

### 3.3 简单情况下的接触时间

我们首先考虑一个根据图像强度计算接触时间的方法, 这种方法光源向观察点  $X$  运动情况, 如图 3(a)所示。在此情况下, 表面法线  $n$  和光源方向的夹角是恒定的, 而式(6)可写作:

$$i = \frac{k}{\|S - X\|^2} = \frac{k}{d^2} \quad (7)$$

这里,  $d$  代表  $X$  与  $S$  的距离, 而  $k$  是常量, 因为它仅依赖于表面的反射和光源的辐射亮度。所以, 强度的平方根可以用如下公式计算:

$$i = \frac{k'}{\|S - X\|} = \frac{k'}{d} \quad (8)$$

这里  $k' = \sqrt{k}$ . 由于  $i$  和距离  $d$  即公式

(1)中的  $y$  是成反比例的, 我们能够根据图像强度估算接触时间  $TC$  如下:

$$TC = \frac{\sqrt{i}}{\sqrt{i'} - \sqrt{i}} \quad (9)$$

这里,  $i'$  代表  $t+1$  时刻的观察强度。通过此方法, 我们能够仅凭图像强度估算接触时间, 而不必用到其他信息, 比如表面的反射, 光源的辐射亮度以及焦距。

### 3.4 复杂情况下的接触时间

我们接下来考虑这样一种方法来计算接触时间, 它根据图像强度在光源没有朝观察点  $X$  方向移动的情况, 如图 3(b)所示。

在这种情况下, 不仅距离还有表面法线与光源方向的夹角都随着光源的运动而变化。为分析角度的变化, 我们将光源  $S$  和观察点  $X$  之间的距离改写为用水平距离  $d$  和竖直距离  $h$  表示的如下形式:

$$\|S - X\| = \sqrt{d^2 + h^2} \quad (10)$$

当表面法线  $n$  是垂直于光源  $S$  的运动方向时, 式(6)可以被改写为用水平距离  $d$  和竖直距离  $h$  表示的如下形式:

$$i = \frac{hE\rho}{(d^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (11)$$

由于光源的运动仅在水平方向, 竖直方向的距离  $h$  是恒定的。所以, 通过对强度  $i$  求关于时间  $t$  的导数, 我们有:

$$j = \frac{di}{dt} = \frac{di}{dd} \frac{dd}{dt} = \frac{-3sE\rho h d}{(d^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (12)$$

这里  $s = \frac{dd}{dt}$  是光源移动的速度, 而我们假设它是匀速的。注意, 推论公式的分母是式(11)中所示  $i$  表达式的分母的幂。所以, 我们能通过公式计算  $I$  来估算  $(d^2 + h^2)$  这一项如下:

$$I = \frac{i^{\frac{5}{3}}}{j} = -\frac{(E\rho h)^{\frac{5}{3}}}{3s} \cdot \frac{1}{d} = \frac{k''}{d} \quad (13)$$

这里  $k''$  是一个常量, 因为它仅依赖于辐射亮度  $E$ , 反射  $\rho$ , 垂直距离  $h$  和光源的速度  $s$ 。最后, 我们可以使用  $I$  估算接触时间如下:

$$TC = \frac{I}{I' - I} \quad (14)$$

这里  $i'$  是通过式(13) 计算的  $t+1$  时刻的值。通过这个方法, 我们可以估算移动光源的接触时间, 即使光源并不朝对象方向移动。

## 4. 基于环境光下的强度的接触时间

到目前为止, 我们提出了通过图像强度估算接触时间的方法。然而, 已提出的方法假定场景中只有一个移动光源。所以如果有向移动光源一样的环境光, 该方法就无法很好地应用。为此, 我们下面将该方法进一步拓展, 使之在即使有环境光存在的条件下, 也能通过图像强度估算接触时间。

### 4.1 简单情况下

我们首先考虑一种在简单情况下估算接触时间的方法，当光源朝向观察点移动如图 3(a)所示的情况。当场景中有环境光时，观察强度可以表示如下：

$$i_a = \frac{k}{\|\mathbf{S}-\mathbf{X}\|^2} + a = \frac{k}{d^2} + a \quad (15)$$

这里， $a$  是环境光影响的图像强度部分。现在，我们求关于时间  $t$  的导数，如下：

$$j_a = \frac{di_a}{dt} = \frac{-2ks}{d^3} \quad (16)$$

正如式(16)所示，常量  $a$  在 中消失，而  $\frac{1}{d^3}$  的立方根和距离  $d$  成反比。所以，接触时间  $TC$  可以按如下公式计算：

$$TC = \frac{\sqrt[3]{j_a}}{\sqrt[3]{j_a'} - \sqrt[3]{j_a}} \quad (17)$$

在这个等式中，环境光  $a$  的影响完全能估算，所以即使场景中存在环境光，我们也能够计算接触时间。

#### 4.2 在复杂情况下

我们接着考虑图 3(b)中光源没有向观察点  $X$  运动的情况。从式(11)中，我们发现，受环境光影响的部分为  $a$  的观察强度  $i_a$  可以表示如下：

$$i_a = \frac{E\rho h}{(d^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}} + a \quad (18)$$

然后我们求  $i_a$  关于时间  $t$  的导数如下：

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{-3sE\rho hd}{(d^2 + h^2)^{\frac{5}{2}}} \quad (19)$$

由于环境光部分  $a$  是常量，它不出现在式(19)中。现在，我们假设光源的高度  $h$  相比于距离  $d$  很小，因此就有在式 (19) 中的 可忽略不计。所以，式 (19)可以可以近似写成如下形式：

$$\frac{di_a}{dt} \sim \frac{-3sE\rho hd}{(d^2)^{\frac{5}{2}}} = \frac{k}{d^4} = j_a \quad (20)$$

由于  $j_a$  的四次方根和距离  $d$  成反比，接触时间  $TC$  可近似表示如下：

$$TC = \frac{\sqrt[4]{j_a}}{\sqrt[4]{j_a'} - \sqrt[4]{j_a}} \quad (21)$$

由于式(21)中不存在环境光部分，所以即使环境光存在，我们仍可以估算接触时间。

## 5. 无需图像导数的接触时间

### 5.1 复杂情况下

到现在我们提出了通过图像强度的导数来估算接触时间的方法。已提出的方法在我们获取了准确的图像强度时适用。然而，观察到的图像常常包括图像噪声，所以，我们可能无法计算出可靠的图像导数。特别地，当光源到观察点的距离很长时，图像噪声的影响比起图像导数相对较大。所以，在这部分，我们提出了一个有效的方法，该方法在不使用导数的情况下估算接触时间。虽然上一部分的方法能近似求得结果，本段的方法它比上一部分的方法更为稳定。

让我们在  $t+1$  时刻考虑强度  $i'$ 。由于  $t$  时刻的强度  $i$  如式(18)所示,  $t+1$  时刻的强度  $i'$  可表示如下:

$$i' = \frac{E\rho h}{((d+s)^2 + h)^{\frac{3}{2}}} \quad (22)$$

这里  $s$  是单位时间内的光源运动长度。接下来, 计算  $i$  和  $i'$  的  $2/3$  次方, 我们有:

$$i^{\frac{2}{3}} = \frac{(E\rho h)^{\frac{2}{3}}}{(d+s)^2} \quad (23)$$

$$i'^{\frac{2}{3}} = \frac{(E\rho h)^{\frac{2}{3}}}{(d+s)^2 + h} \quad (24)$$

从式(23)和式(24)中, 我们发现  $i^{\frac{2}{3}}$  和  $i'^{\frac{2}{3}}$  的关系可以用  $d, s$  和  $h$  表示如下:

$$\frac{i'^{\frac{2}{3}}}{i^{\frac{2}{3}} - i'^{\frac{2}{3}}} = \frac{d^2 + h^2}{2ds + s^2} \quad (25)$$

一般来说, 光源的运动路程  $s$  和距离  $d$  比起来足够小。另外, 竖直高度  $h$  和水平距离  $d$  相比通常也很小。所以,  $s^2$  这一项和  $h^2$  这一项在式(25)中是可忽略的, 假设  $s$  和  $h$  和  $d$  相比足够小。因此, 式(25)可以近似表示如下:

$$\frac{i'^{\frac{2}{3}}}{i^{\frac{2}{3}} - i'^{\frac{2}{3}}} \sim \frac{d}{2s} \quad (26)$$

由于接触时间  $TC$  可以定义为, 我们能使用  $i^{\frac{2}{3}}$  和  $i'^{\frac{2}{3}}$  近似估算接触时间  $TC$  如下:

$$TC \sim \frac{2i^{\frac{2}{3}}}{i^{\frac{2}{3}} - i'^{\frac{2}{3}}} \quad (27)$$

这个公式, 不同于式(14), 我们无需强度的导数。所以, 式(27)所计算出的接触时间比式(14)计算出的结果要稳定的多。

## 5.2 环境光和接触时间的同步估算

虽然我们提出了无需图像的导数就能计算接触时间的方法, 但该方法在环境光不存在时有局限性。为应对不使用图像导数时的环境光问题, 我们在这一部分提出了同步估算接触时间和环境光的问题。

我们首先考虑光源朝观察点移动, 如图 3(a)所示情况。令  $a$  表示环境光一项。接下来从式(9)中, 我们发现接触时间  $TC$  可以估算如下:

$$TC = \frac{\sqrt{i-a}}{\sqrt{i'-a} - \sqrt{i-a}} \quad (28)$$

这里  $i$  和  $i'$  分别表示  $t$  和  $t+1$  时刻的观察强度。由于光源匀速移动, 前一时刻的接触时间可以估算如下:

$$TC-1 = \frac{\sqrt{i'-a}}{\sqrt{i''-a} - \sqrt{i'-a}} \quad (29)$$

这里  $i''$  是  $t+2$  时刻的强度。根据式(28)和式(29), 环境项和观察强度可以表示如下:

$$\frac{\sqrt{i-a}}{\sqrt{i'-a} - \sqrt{i-a}} = \frac{\sqrt{i'-a}}{\sqrt{i''-a} - \sqrt{i'-a}} + 1 \quad (30)$$

所以, 我们估算环境项  $a$  时可通过减小如下项:

$$e = \frac{\sqrt{i-a}}{\sqrt{i'-a} - \sqrt{i-a}} - \frac{\sqrt{i'-a}}{\sqrt{i''-a} - \sqrt{i'-a}} - 1 \quad (31)$$

通过估算  $a$ , 我们就能使用式(28)来估

算接触时间，即使场景中仍存在环境光。

我们下面考虑图 3(b)所示的复杂情况。根据式(30)，这种情况下的接触时间可估算如下：

$$TC = \frac{2(i-a)^{\frac{2}{3}}}{(i'-a)^{\frac{2}{3}} - (i''-a)^{\frac{2}{3}}} \quad (32)$$

根据环境项  $a$  和强度的关系，我们得到了环境项的估算值，如下：

$$TC = \frac{2(i-a)^{\frac{2}{3}}}{(i'-a)^{\frac{2}{3}} - (i''-a)^{\frac{2}{3}}} - \frac{2(i'-a)^{\frac{2}{3}}}{(i''-a)^{\frac{2}{3}} - (i'''-a)^{\frac{2}{3}}} - 1 \quad (33)$$

通过减小  $e$ ，我们能够估算环境项  $a$ ，所以我们可以用式(23)在复杂情况下估算接触时间。

在实际应用中，这些技术在应对图像噪声方面，比前文提到的使用图像导数的方法稳健得多，因为图像噪声对强度的导数影响比强度本身更大。

## 6. 实验结果

### 6.1 在有对向目标 (Facing Target) 的情况下：

在这一部分，我们会展示提出方法的实验结果。我们首先展示当光源正面朝向对象情况下的实验结果。图 4(c)展示了实验的建立。在此试验中，我们使用的是图 4(a)所示的光源，并用照相机观察图 4(b)所示的石膏立方体。光源照亮了石膏立方体如图 4(c)所示，并且向石膏立方体水平移动。从光源到对象的距离从 200cm 逐渐减少到

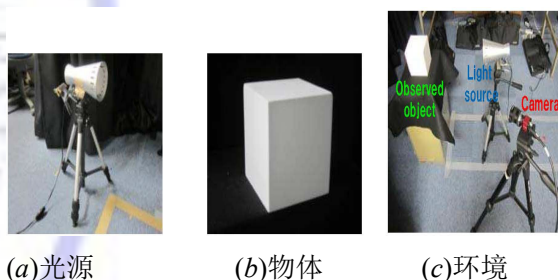
50cm。光源移动的速度是 10cm/s。固定好的照相机每秒拍摄一次图像。场景中还有不少静止的光源提供环境光。观察到的图像如图 5 所示。用来估算接触时间的强度，通过对图像中心周围 100 像素\*100 像素的区域内的强度取平均值得到。依靠这些图像，接触时间可用三种方法估算，分别是：

(a) 式(9)所示方法。该方法不考虑环境光；

(b) 式(17)所示方法。该方法通过图像的导数来消除环境光的影响；

(c) 式(28)所示方法。该方法无需图像的导数即可消除环境光的影响。

接触时间的估算值如图 6 所示。方法(a)所得结果由蓝色线表示，与黑色线表示的实际值有较大偏差。这是因为方法(a)忽略了图像中环境光的存在。方法(b)所得结果由绿色线表示，在光源到观察点的距离较小时比(a)准确。然而，当距离增大时，结果变得不稳定。这是因为这种方法下，当强度在距离较大时的改变量变小时，图像导数变得不稳定。大时的改变量变小时，图像导数变得不稳定。方法(c)的结果由红色线表示，如图 6 所示，是三种方法中最佳的。它比(b)稳定得多，比(a)准确得多。



(a)光源 (b)物体 (c)环境

图 4. 实验设备和环境



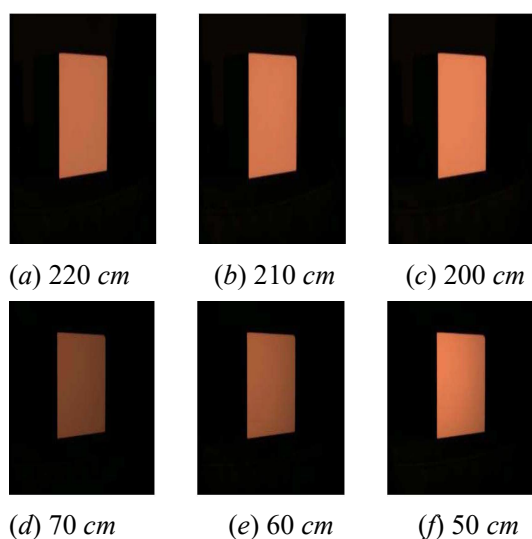


图 5. 不同距离下的图像样例

从结果中，我们发现使用方法(c)可以恰到好处地消除环境光的影响，并且可以准确地估算接触时间。

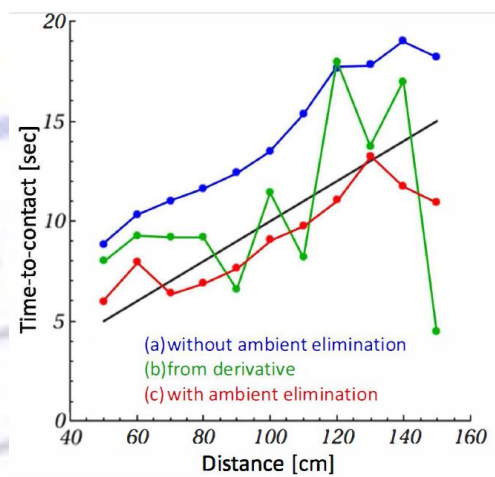


图 6. 估计的接触时间。接触时间共有三种估计方法。黑色的线表示的是地表真值。蓝色的线表示没有环境消除的结果，绿色的线表示根据图像导数所得的结果，而红色的西安表示有环境消除的结果。

## 6.2 在非对向目标 ( Non-Facing Target) 的情况下

我们接下来展示当观测点不在光源运动的方向上时的实验结果。图 7

展示了实验环境。

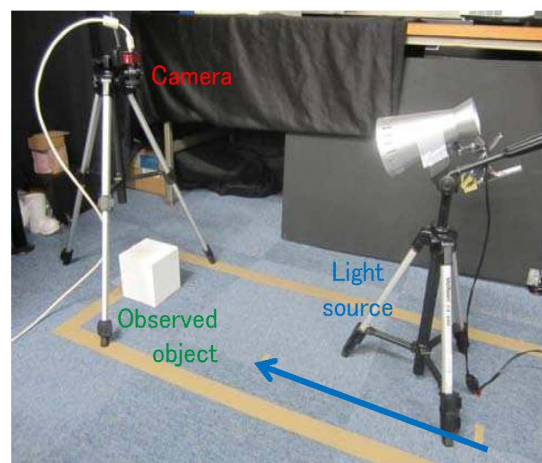


图 7. 实验环境

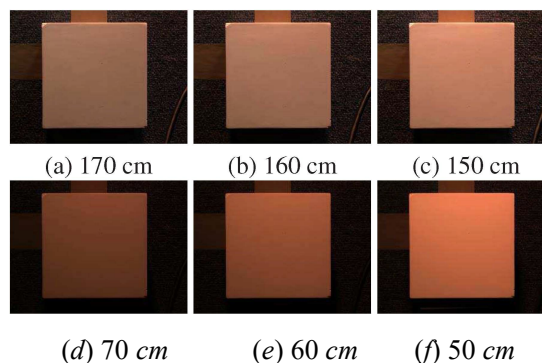


图 8. 图像示例。照相机明亮度参数为获得合适的图像强度而自动改变。

在这个实验中，对象的顶端表面被光源照射，并由固定的相机观察。这个实验与图 3(b)的情况一致。光源沿着蓝色箭头的方向移动，将距离由 200cm 缩短为 50cm。观察图像的例子如图 8 所示。在这个试验中，用来控制图像亮度的照相机参数每 3 秒改变一次，所以能获得足够亮的图像。虽然我们不知道任何关于照相机明亮度参数的信息，用来计算接触时间的一套两个图像是在照相机的同等参数的条件下拍摄的，所以用提出的方法估算接触时间是没有问题的。

估算接触时间有三种方法，分别

是：

(a) 式(14)所示的方法，此方法未估算环境光；

(b) 式(21)所示的方法，此方法通过图像导数估算环境光；

(c) 式(32)所示的方法，此方法无需使用图像导数就能估算环境光。

图像中心周围 200 像素\*200 像素的平均强度能用来估算接触时间。方法(a)和方法(b)中强度的导数能够用两个连续时刻拍摄的图像计算。光源移动的速度是 10cm/s，而图像每秒拍摄一次。光源和观察对象的水平距离是 50cm。

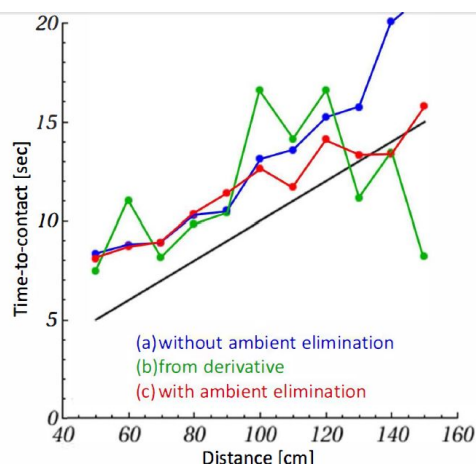


图 9. 估计的接触时间。接触时间共有三种估计方法。黑色的线表示的是地表真值。蓝色的线表示没有环境消除的结果，绿色的线表示运用图像导数的结果，而红色的线表示由环境光消除的结果。

估算的接触时间如图 9 所示。结果是，方法(c)有环境消除，结果最优。虽然方法(b)有时提供了更优的结果，但它因对噪声敏感而不够稳定。虽然方法(a)提供了稳定的结果，但它收到了了环境光的影响。上述结果说明，方法(c)中的接触时间是最稳定和准确

的。

### 6.3 在实际环境中

最后，我们展示在户外有汽车尾灯照明的环境下的实验结果，如图 10 所示。在此实验中，汽车倒着向墙行驶。墙由汽车尾灯照亮，我们通过照相机观察。如图所示，墙上没有明显的几何特征。汽车的速度是 1m/s。照相机每秒捕获一张图像，而每一刻的接触时间分别根据图像信息用方法(a),(b),(c)估算，像前面的实验一样。图 11(a)和(b)展示了一组照相机捕获的连续图像，用来计算接触时间。图 11(c)和(d)展示了另一组连续图像。正如所展示的那样，图像中并没有边、角之类的几何信息。然而，我们可以根据图像强度的变化估算接触时间。

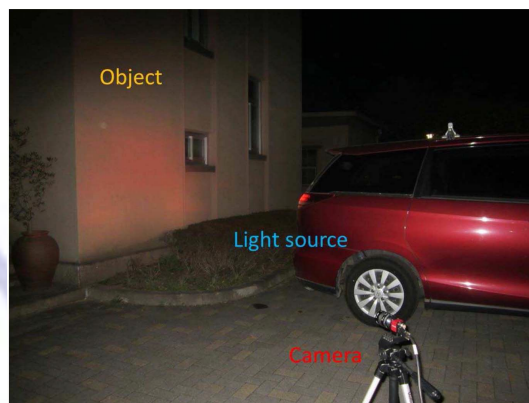


图 10. 实验环境（尾灯）



(a) 2m (b) 3m (c) 4m (d) 5m

图 11. 图像示例。车尾与墙之间的距离由 8m 缩小为 2m。

根据图像估算的接触时间如图 12 所示。在这张图中，蓝色的线表示方法(a)的结果，绿色的线表示方法(b)的结果，红色的线表示方法(c)的结果，而黑色的线表示地面真值 (*ground truth*)。方法(c)所得的结果和地面真值非常接近，而方法(a)所得的结果则有因环境光造成的偏差，至于方法(b)所得结果则对噪声敏感。从这些结果中，我们发现提出的方法能够准确地估算接触时间，即使图像没有明显的几何特征或场景中存在环境光。

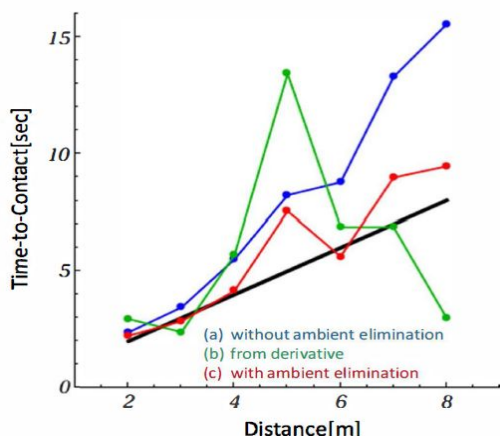


图 12. 估计接触时间根据 (a) 式(9), (b) 式(17) 和 (c) 式.(28).

我们同时展示了汽车前灯的实验结果，如图 13。在这个试验中，汽车正面向墙行驶。前灯的光确切地讲并不点光源。同时，墙面的反射特性也表明它不是真正的朗伯体。然而，我们仍然进行此试验，并评估了它在这些场合的适用性。图 14 展示了获取图像的几个示例。在这些图像中，前面被车前灯照亮。注意，照相机捕获的强度由每一组的两个图像决定，故我们可获取足够的图像强度。

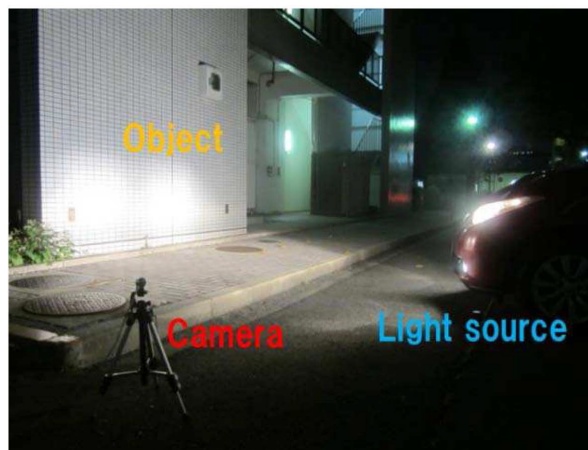


图 13. 实验环境 (头灯)

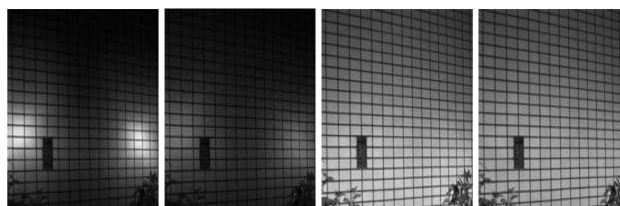


图 14. 观察图像

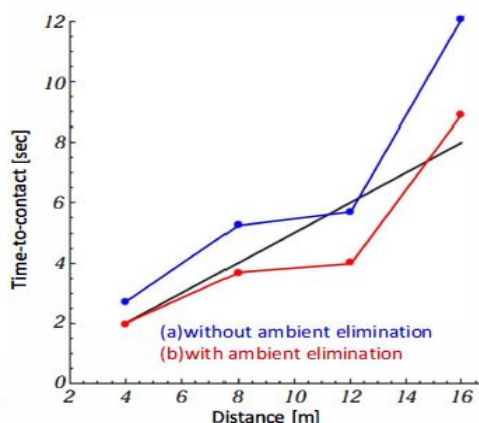


图 15. 根据观察强度估计接触期。红色的线表示有环境消除的方法结果，蓝色的线表示没有环境消除方法的结果。

估算得到的接触时间如图 15 所示。在这张图中，蓝色的线表示的是没有考虑环境光的方法，而红色的线表示的是无需使用图像导数估算环境光的方法。看来，无需使用图像导数估算环境光的方法提供了更优的结果。这些结果表明提出的方法在应对场景存在多光源，表面反射和环境光问题时相当稳健 (*robust*)。

## 7. 结论

在本文中，我们提出了使用光度 (*photometric*) 信息计算接触时间的方法。当一个光源在场景中移动时，观察强度随光源的运动而改变。在本文中，我们分析了照相机的图像的强度变化，并揭示了接触时间可以仅根据图像强度的变化就能计算。

我们首先推导了一个基础方法，根据图像强度的变化来估算光源的接触时间。接着，我们拓展了此方法，所以我们能在场景中存在环境光的条件下计算接触时间。再进一步，我们展示了一个对图像噪声的较不敏感的稳健方法。

我们实践了这些方法，并比较了它们在真实的图像实验中的准确度。我们揭示了，在图像噪声环境下，环境光的估算和接触时间的估算，在精确度和稳定性的感知上是高效的。

我们的方法不需要其他附加信息，诸如光源的辐射亮度，对象的反射和对象表面的方向等。因此，提出的这个方法可以有多种应用，比如汽车驾驶员辅助。

### 参考文献：

- [1] R. Cipolla and A. Blake. Surface orientation and time to contact from image divergence and deformation. In Proc. European Conference on Computer Vision, pages 465-474, 1992.
- [2] C. Colombo and A. Del Bimbo. Generalized bounds for time to collision from first-order image motion. In Proc. International Conference on Computer Vision, pages 220-226, 1999.
- [3] Guillem, A. Negre, and J. Crowley. time to contact for obstacle avoidance. In European Conference on Mobile Robotics, pages 19-24, 2009.
- [4] Horn, Y. Fang, and I. Masaki. Time to contact relative to a planar surface. In Proc. Intelligent Vehicles Symposium, pages 68-74, 2007.
- [5] M. Liao, L. Wang, R. Yang, and M. Gong. Light fall-off stereo. In Proc. International Conference on Computer Vision (CVPR'07), pages 1-8, 2007.
- [6] M. I. A. Lourakis and S. Orphanoudakis. Using planar parallax to estimate the time-to-contact. In Proc. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, volume 2, pages -645, 1999.
- [7] F. Mayer and P. Bouthemy. Estimation of time-to-collision maps from first order motion models and normal flows. In International Conference on Pattern Recognition, pages 782, 1992.
- [8] D. Muller. Time to contact estimation using interest points. In Proc. Intelligent Transportation Systems, pages 1-6, 2009.
- [9] Negre, C. Braillon, J. L. Crowley, and C. Laugier. Real-time time-to-collision from variation of intrinsic scale. In Proc. of the Int. Symp. on Experimental Robotics, 2006.

- [10] M. Subbarao. *Bounds on time-to-collision and rotational component from first-order derivatives of image flow.* *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 50(3):329-341,1990.

