

# 基于物理模型的彩色图像分割

黄玉明

(北京控制工程研究所 100080)

徐光祐

(北京清华大学计算机系 100084)

叶培建

(中国空间技术研究院)

## 摘 要

本文给出一个基于光学物理模型的真实彩色图像分割算法。算法首先对图像上的颜色变化(由光照和物体颜色引起)进行分析与综合,然后分割图像。算法的基础是双色反射模型理论,该理论认为反射光的颜色是界面反射(耀斑颜色)和本体反射(物体颜色)的线性组合,这两种反射光在颜色空间的三维直方图中形成特定的聚类(点簇)。因此分析聚类的性质可帮助确定光照和物体的颜色,但是有意义的聚类的生成又以图像中物体区域的确定为前提。算法按照假设检验的策略,依据图像中的连通性和颜色空间中聚类的特征,完成彩色图像的分割,并产生对景物中所发生的光学过程的物理描述。该描述包括本征反射图像、分割图像、物体和光照颜色的符号描述。本征反射图像包括只反映界面反射的耀斑图像和从原图像中去除耀斑影响后的本体图像。

**关键词:** 双色反射模型,本征图像,彩色图像分析,彩色图像分割

## 一、概 述

国内外关于彩色图像分割和理解工作的历史都很短暂。初期采用单色图像的分析方法,将彩色图像仅仅看成是三幅单色图像的叠加,将图像中的颜色变化看成统计现象,得到的分割结果的区域不与物体区域相重合;1987年,Allan<sup>[3]</sup>和Klinker<sup>[4]</sup>等人根据光学物理模型(即双色反射模型)分析彩色图像中的颜色变化,取得了一些成效,但他们用于实验的图像不是真实彩色图像,而是在彩色摄像机镜头前放置不同的滤色片,对同一景物得到红、绿、蓝三幅图像,然后迭加合成的;原因是在彩色图像分割中应用双色反射模型之前,必须恢复摄像机的光谱线性性质,而Klinker等人只完成了单色摄像机的光谱线性性质恢复工作。本文通过实验直接测定彩色摄像机的光谱性质,恢复了红、绿、蓝单个波段的光谱线性性质和整体光谱线性性质<sup>[5]</sup>,因而可以对由彩色摄像机直接获取的彩色图

像利用基于物理模型的方法做分割,并抽取本征图像。

## 二、彩色图像的成像和分割

### 2.1 双色反射模型 (Dichromatic Reflection Model)<sup>[1]</sup>

投射到非导体 (Dielectric Material) 如塑料上的入射光,有一部分被物体表面直接反射出去,这部分反射光与入射光同色。剩余部分的入射光进入物体内部,这部分的入射光被物体散射并在某些波段上被物体吸收,然后穿出物体。经过物体内部的反射光的颜色由光照颜色和物体的反射性质决定。本文中分别称这两种过程为“界面反射” (Interface Reflection) 和“本体反射” (Body Reflection)。

双色反射模型认为,景物中一点的光谱辐射  $L(\lambda, i, e, g)$  是一个界面反射分量  $L_i(\lambda, i, e, g)$  和一个本体反射分量  $L_b(\lambda, i, e, g)$  之和。其中,  $\lambda$  为光的波长,  $i$  为入射角,  $e$  为出射角,  $g$  为相位角。假设光照和物体反射的光谱性质与表面的朝向无关,则每个反射分量又可分解为表示颜色的光谱因子  $C(\lambda)$  和表示几何关系因素的几何因子  $m(i, e, g)$  之积。所以有下列各式:

$$L(\lambda, i, e, g) = L_i(\lambda, i, e, g) + L_b(\lambda, i, e, g), \quad (2.1)$$

$$L_i(\lambda, i, e, g) = m_i(i, e, g)C_i(\lambda), \quad (2.2)$$

$$L_b(\lambda, i, e, g) = m_b(i, e, g)C_b(\lambda). \quad (2.3)$$

### 2.2 摄像机模型

彩色摄像机用三原色表示景物反射到摄像机镜头的入射光的光谱。在成像过程中,摄像机将投射到靶面像素位置  $\langle x, y \rangle$  的光的连续光谱通过三原色相加转换成在颜色空间中表示的颜色坐标  $\langle r, g, b \rangle$ , 即  $C(x, y) = \langle r, g, b \rangle$ 。这实际就是对各个波长的光强按不同的加权求和,这里的权由相应的滤色片(红,绿,蓝)的透射率和摄像机的光敏特性所决定。本文把彩色像素值  $C(x, y)$  表示成界面反射颜色向量  $C_i$  和本体反射颜色向量  $C_b$  的线性组合,系数为  $m_i(i, e, g)$  和  $m_b(i, e, g)$ , 由图像上  $\langle x, y \rangle$  点所对应的景物点的几何因素决定。故有下式:

$$C(x, y) = m_i(i, e, g)C_i + m_b(i, e, g)C_b. \quad (2.4)$$

(2.4)式中  $C_b$  和  $C_i$  分别取决于表面材料和光源的光谱特性,与几何位置无关。因此在某(单色)物体上均为常数,而  $m_i$ ,  $m_b$  随位置变化。按照双色反射模型,根据景物的彩色图像确定光源和物体颜色的问题,就归结为根据  $C(x, y)$ , 按照方程(2.4)分解出界面反射颜色向量  $C_i$  和本体反射颜色向量  $C_b$ 。必须补偿摄像机在实际成像过程中的限制,使得成像过程符合双色反射模型。

颜色截断 (Color Clipping): 实际摄像机只有一个有限的动态范围来感受入射光的亮度,所以本文的分析只限于在一个颜色立方体中进行。如果在某个像素位置上入射光过强,摄像机就不能感受和表示,因而光的测量就在一个或多个颜色波段上被截断。在这些点上,正常的辐射强度与像素值关系遭到破坏。结果各物体耀斑中心都可能有一些像素不落入该物体的双色平面内。在平面型分割时,这些点未能归入物体区域。由于这些像素中的颜色信息很不可靠,算法的颜色分析避开了这些像素。算法使用几何启发式规



则, 将这些噪音像素归入相应的物体区域。由于这种类型的噪音像素一般位于各物体耀斑的中心, 算法从耀斑像素出发, 将平面型区域延伸到与耀斑像素相邻的并且包含很亮的像素(像素至少在一个波段上达到饱和)的(小)区域。该启发式规则将耀斑中心的噪音像素归入相应的物体区域, 并且保持其它图像区域不变。

**颜色均衡 (color balancing):** 一般的 CCD 摄像机对红光比对蓝光更敏感, 并且未去除的红外线也会影响图像的颜色。本文采用浅蓝色的红外线截断玻璃过滤入射光, 这样既可消除红外线的影响, 又降低了对红光的敏感性。

**$\gamma$ -校正 (Gamma Correction):** 像素值依赖于摄像机对入射光的反应。由于摄像机内部的  $\gamma$ -校正和其它的一些变换(如: 颜色补偿), 使得摄像机的输出和入射光的光强成非线性关系。这种非线性造成颜色空间中的弯曲, 破坏了双色反射模型的线性性。笔者通过实验测定了光强——灰度关系, 对像素值做变换, 恢复了线性关系。

### 2.3 彩色图像的分割

结合双色反射模型和摄像机模型, 界面反射向量  $C_i$  和某单色物体的本体反射向量  $C_o$  在颜色空间中决定了一个双色平面 (Dichromatic Plane)。该物体区域的全部像素对应的颜色点簇全部落入双色平面, 并且呈现特定的形状, 称为楔形 T (Skewed T)<sup>[2]</sup>。本文将图像中由不同颜色物体形成的边界称为物质边界, 将由耀斑形成的边界称为耀斑边界。一般来说, 图像中的每个物体区域都可分成较暗的区域, 较亮的区域和特别亮(耀斑)区域, 分别称其为本体区域, 渐变区域和耀斑区域; 所包含的像素以及对应的颜色点簇也相应定义。

算法的分割依据是彩色图像上的连通性和颜色空间中的聚类。颜色空间是以红、绿、蓝三色为基向量的三维欧氏几何空间。彩色图像的每个像素由  $(r, g, b)$  三元组说明。因而彩色图像的每个像素对应颜色空间中的一个点  $(r, g, b)$ , 彩色图像的每个区域对应颜色空间中的一个点簇(点集合)。因此对颜色空间中的颜色点簇的聚类分析, 将可用于指导图像分割。通过对颜色点簇进行主元素分析, 可将颜色点簇分为四类: (详见表 1) 点型

表 1 局部子图像颜色簇的形状与解释

三个特征值	类别	解 释
sss	点	a. 子图像位于一个平坦的物体区域内。 b. 子图像位于一个黑暗颜色的物体区域内, 不包括耀斑。
1ss	直线	a. 子图像位于一个物体区域内: 本体型颜色簇。 b. 子图像位于一个物体区域内: 耀斑型颜色簇。 c. 子图像包含两个物体区域的像素——像素均属于黑暗的或平坦的物体区域。
11s	平面	a. 子图像位于一个物体区域内: 双色平面(楔形 T)。 b. 子图像包含两个物体区域的像素: 两个本体型颜色簇或单个耀斑型颜色簇。
111	立体	a. 子图像位于一个物体区域内: 噪音像素(截断和光晕)。 b. 子图像包含两个物体区域的像素: 同时包含一个物体上本体像素和耀斑像素, 并且包含另一个物体上的本体像素或耀斑像素。 c. 子图像包含多于两个物体区域的像素。



颜色簇, 直线型颜色簇, 平面型颜色簇和立体型颜色簇; 图像中与此对应的区域分别称为点型区域, 直线型区域, 平面型区域和立体型区域; 所对应的像素称为相应类型的像素. 三维直方图就是给每个三维点赋予一个频数的三维颜色空间(参见照片 2). 主要实验装置包括 PULNIX-TMC56R 彩色 CCD 摄像机和 IMAG 彩色图像工作站, 该工作站是由 SUN 公司的 SUN386i 工作站和 Data Translation 公司的真彩色图像处理板 DT 2858, DT2869, DT2871 以及 IMAG 的彩色图像监视器所组成. 以一个字节表示一种原色信息, 颜色空间和三维直方图在每一维上的变化范围均为 0—255. 而图像的分辨率为  $512 * 512$ .

### 三、分割算法

#### 3.1 算法概述

算法采用“假设-验证”的分析方法, 根据光线反射的物理模型, 由底向上地分析并验证景物的局部和整体特性, 包括物体和光源的颜色, 利用这些性质解释图像中像素的颜色. 算法将其图像解释过程与局部景物特性结合起来, 对图像中不同位置的颜色(变化)进行不同的处理.

算法的大致步骤如下:

- 1) 对图像上各局部区域的颜色变化做初步的粗略描述;
- 2) 产生有关本体型色簇的假设, 并利用这些假设分割图像;
- 3) 扩充本体型色簇假设成双色平面上的楔形 T 颜色簇假设, 并利用这些假设再分割图像;
- 4) 分析并补偿截断像素效应;
- 5) 利用这些假设中的物理知识抽取原图像的本征图像——本体图像和耀斑图像.

#### 3.2 颜色簇初始估计的产生

算法的第一步是对图像颜色变化的初步估计. 这些初步估计很粗糙, 但却是形成下文的直线型颜色假设和平面型颜色假设的基础.

1) 局部颜色变化的分类模式. 为了对图像局部颜色变化进行估计和分类, 算法将图像分割成固定大小的互不重叠的子图像, 然后在颜色空间中分析子图像, 找出其颜色簇分布的主方向. 该方向可由计算该颜色簇的协方差矩阵的特征值和特征向量得到<sup>[2]</sup>. 特征值和特征向量确定了包含颜色簇的最小椭球的大小和方向. 为方便起见, 将特征值按递减顺序排序. 包含颜色簇的椭球的形状提供了联系局部颜色变化与物理解释的信息. 基于颜色簇的三个特征值的大小, 将椭球分为四类, 对每一类都给出几种可能的物理解释. 考虑到摄像机噪音和环境光等诸因素, 取适当的阈值. 当特征值大于该阈值时定义特征值为 1, 反之为 s.

照片 3 显示了对照片 1 分类的结果(子图像大小为  $8 * 8$ ). 点、直线、平面和立体类型的簇分别用黄、红、绿、蓝色表示.

2) 相容颜色变化估计的确定. 从照片 3 中可以看出, 物体内部较暗的部分是红色; 较亮的部分是绿色的; 耀斑中心是蓝色的; 物体的边缘是绿色或蓝色,<sup>[3]</sup>也可能因为图像较



暗,没有绿色或蓝色;背景为黄色,但由于噪音存在而为红色或绿色。算法考虑两种类型的子图像:直线型和平面型。前者指出该子图像的本体反射或耀斑反射的变化方向,后者给出双色平面的信息。算法通过合并这样的子图像为产生图像颜色变化假设积累证据。合并结束也就完成了对图像的初始分类,确定了各类别区域在图像上的位置和面积,以及在颜色空间中的方向和位置

### 3.3 基于直线型假设的图像分割

本文算法利用对颜色簇的初始估计,产生图像颜色变化的假设,并将此假设应用于图像分割。

1) 产生直线型假设 算法选取图像中面积较大的直线型区域,重做主元素分析,求出该直线型颜色簇的第一个特征向量和均值点,以产生直线型假设(参见照片4)。这种区域(面积较大的)一般对应于物体内部的本体区域。

2) 运用直线型假设。颜色簇的直线型假设为相应区域的颜色变化提供了一个模型,其均值点和第一个特征向量描述了直线型颜色簇的位置和方向,其第二,三个特征值确定了颜色簇在垂直于主轴方向上的分散程度。根据双色反射模型,沿主轴方向的颜色变化的原因可归结于景物和环境的物理性质:本体反射,界面反射或物质边界。这里,把垂直于主轴方向的颜色变化归结为噪音,用圆柱体来模拟直线型颜色簇,其半径由摄像机的噪音所决定。算法从形成颜色簇的图像区域(老区域)中选择新区域的开始像素,该像素在颜色空间中的映射点必须位于圆柱体内。算法递归地检查每个新区域像素的四邻域,如果某个邻域像素在颜色空间中的映射点也位于圆柱体内,则将其标为新区域像素,直到新区域不再扩充为止,结果是一个与当前直线型假设一致的新图像区域。在初始分类中产生的点型区域,由于其中的像素都映射到颜色空间的圆柱体内,因而都被合并到相应的新区域中。

算法重复执行上述步骤,按递减顺序选择直线型区域,直到区域的面积小于某个阈值为止。原则上讲,得出的直线型区域总在某方面与景物的物理过程相联系。直线型颜色簇可能是本体型颜色簇或耀斑型颜色簇,甚至可能是跨越物质边界的两个颜色簇的组合。但是耀斑型颜色簇和跨越物质边界的颜色簇所对应区域的面积都比本体型颜色簇所对应区域的面积小得多。算法只考虑具有较大面积的直线型假设——本体型颜色假设,下文中的直线型区域均对应本体型(直线)颜色簇。

### 3.4 基于平面型假设的图像分割

直线型假设分割没有考虑界面反射(即耀斑)的影响。下文将直线型假设扩充成平面型假设,以确定双色平面和楔形T的性质。

1) 产生平面型假设。算法从已经得到的直线型假设——楔形T的一个分支出发,确定楔形T的另一个分支(耀斑分支)。对每个直线型区域,考虑它的全部相邻区域(做为候选耀斑区域)。部分相邻区域可能是周围其它物体的本体型区域,其余相邻区域则是当前物体(直线型区域所对应的物体)内部的耀斑型区域,必须区分这两类区域,以避免将两个相邻区域的本体型颜色簇配对产生错误的楔形T。算法以区域像素数目加权,对各个候选耀斑簇与当前本体簇的交点求平均,然后找到其交点距平均交点最近的一个候选耀斑区域,做为该物体的整个耀斑区域的代表。因为各物体的界面反射颜色都接近于光照的



颜色,故所有的耀斑簇都互相平行且平行于光照向量,即任意两个双色平面的交线都平行于一条直线,该直线就是光照向量。算法对各个耀斑簇的方向取平均,得到对整幅图像光照向量的假设。算法将已知的各本体型假设,各耀斑型假设和光照向量结合起来,产生了平面型假设。该假设用本体簇和耀斑簇的位置和方向描述楔形T的形状。光照向量与本体簇的方向的叉积给出了双色平面的法向量,本体区域和耀斑区域的颜色均值决定了双色平面的位置。

2) 运用平面型假设。算法以双色平面所对应的本体型区域为种子区域,以双色平面内的楔形T为准则,再次对图像做分割。算法递归地每次使用一个假设,直到所有的平面型假设都已被处理过。每个平面型假设描述了对应的物体区域的双色平面的位置和方向,以及双色平面内颜色簇的形状。考虑到摄像机的噪音,算法对双色平面取了厚度阈值,并从平面型假设所对应的本体型区域开始,按照四连通和像素是否落入双色平面扩充新像素。

### 3.5 本征图像的产生

在做完图像分割并求得光照和物体的颜色以后,即可进行像素分解,计算出两幅本征图像:本体图像和耀斑图像。本体图像只反映物体本身的性质,同一个(单色)物体上的颜色变化平缓,仅在物质边界处变化剧烈;耀斑图像只反映光照的性质,同一个(单色)物体上的颜色变化可能很剧烈,甚至比物质边界处的颜色变化还剧烈,其变化的曲线与原图像的颜色变化曲线具有相似的形状。

#### 四、实验结果及本文算法与传统算法的比较

本文对不同光照下的不同景物实验了此算法,实验结果见照片1—8。照片5是本文算法的分割结果,分割区域与各个物体吻合得较好,区域的边界基本对应物体的边界。由于该算法基于物理反射过程,正确模拟了本体颜色变化和耀斑颜色变化,使其得以将各个物体上颜色变化剧烈的耀斑像素(非噪音像素)按照其颜色分类准则归入该物体区域。照片6是本征图像,照片7是耀斑图像。

照片8是传统分割算法的结果。这是一个基于颜色一致性的直方图递归分割算法。耀斑区的像素与物体的其它区域分开,成为单独的区域。原因是传统分割算法的分割准则与成像过程无关。与之相比,基于双色反射模型的分割算法,运用颜色圆柱体和双色平面板,有效地把握了物体的颜色变化。颜色圆柱体和双色平面板是在三维颜色空间中分析各个物体的直线型和平面型颜色变化时得到的,其方向、位置独立于选用的颜色坐标系,当然也独立于预先选定的特性集,所以可以期望直线型和平面型假设比传统分割算法的点型假设更好地描述了物体上的颜色变化,并产生较理想的分割结果。

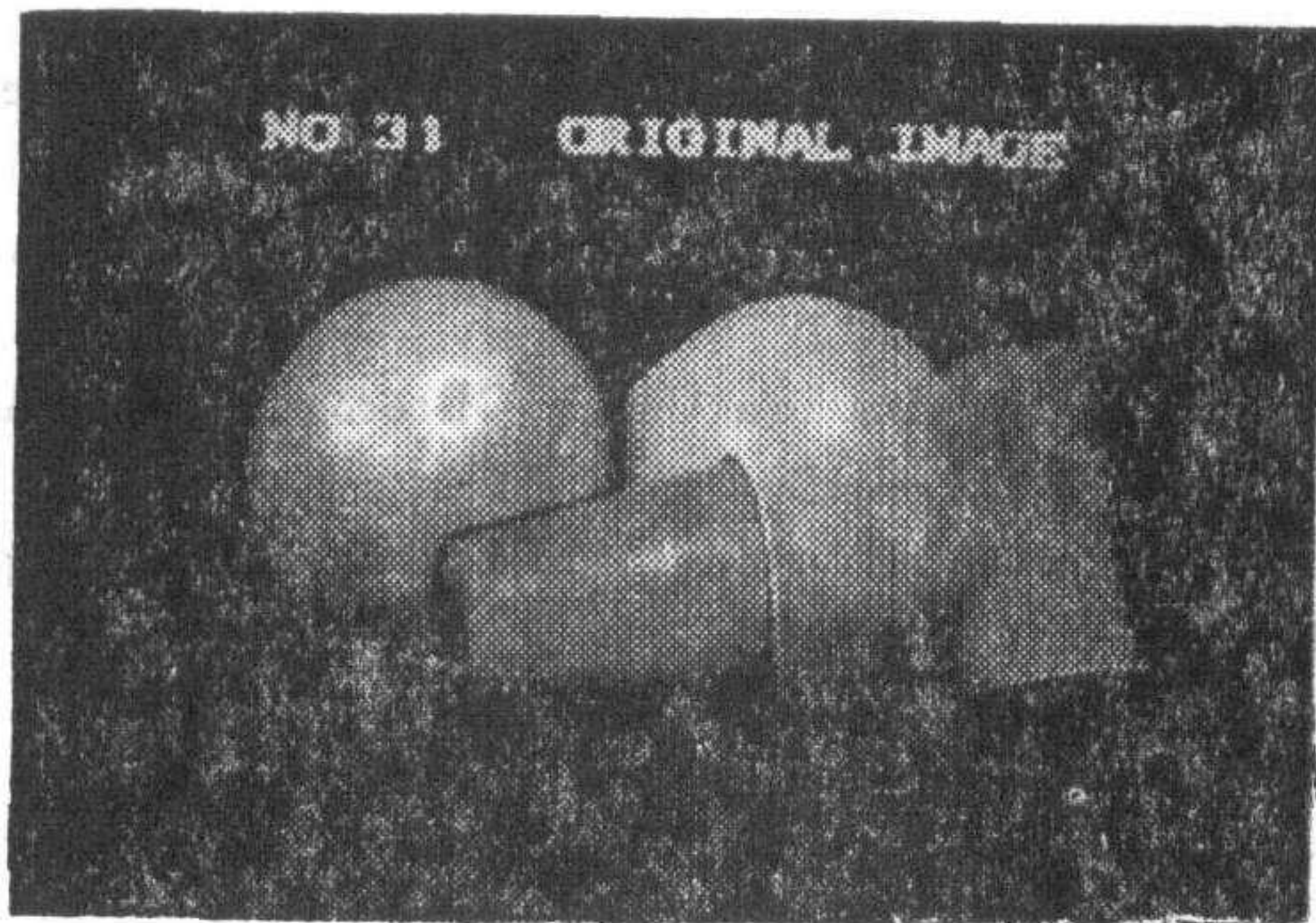
对于传统分割算法,下式中的 Diff (颜色差异)是分割准则:

$$\text{Diff} = k_r(r - E_r)^2 + k_g(g - E_g)^2 + k_b(b - E_b)^2$$

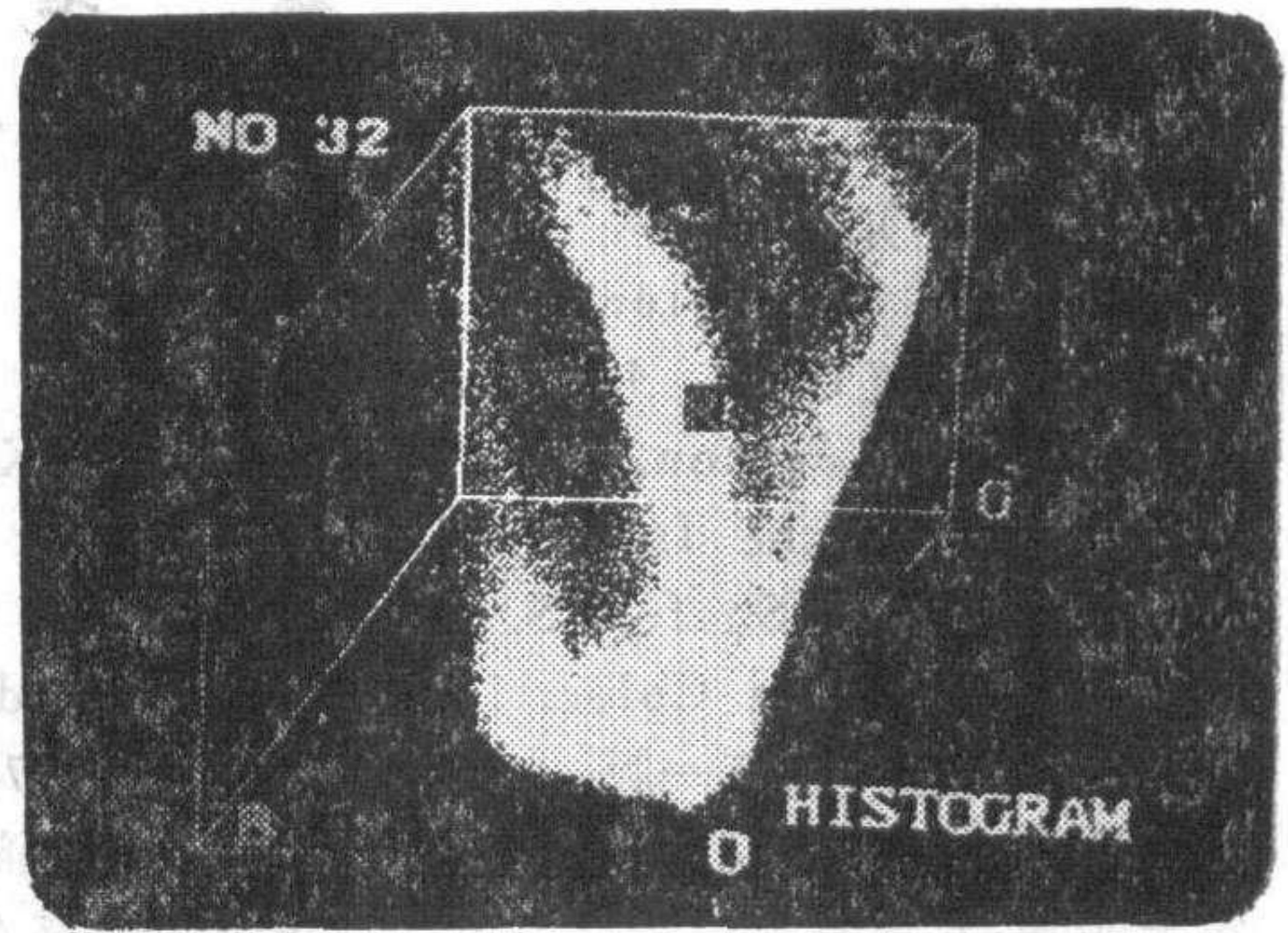
其中  $k_r, k_g, k_b$  是加权系数,是预先定好的,在分割过程中保持不变。 $r, g, b$  是子图像或像素的颜色,  $E_r, E_g, E_b$  是物体的颜色。由于一个物体区域的颜色变化在颜色空间中呈现楔型T,在楔型T的两个分支方向上的变化很大,表现为楔型T的两个分支很长,要想用上式中的 Diff 来把握一个物体区域的颜色变化几乎是不可能的,或者该椭球包含了许多不属于该物体的颜色点,或者该椭球未能包含全部属于该物体的颜色点。即使



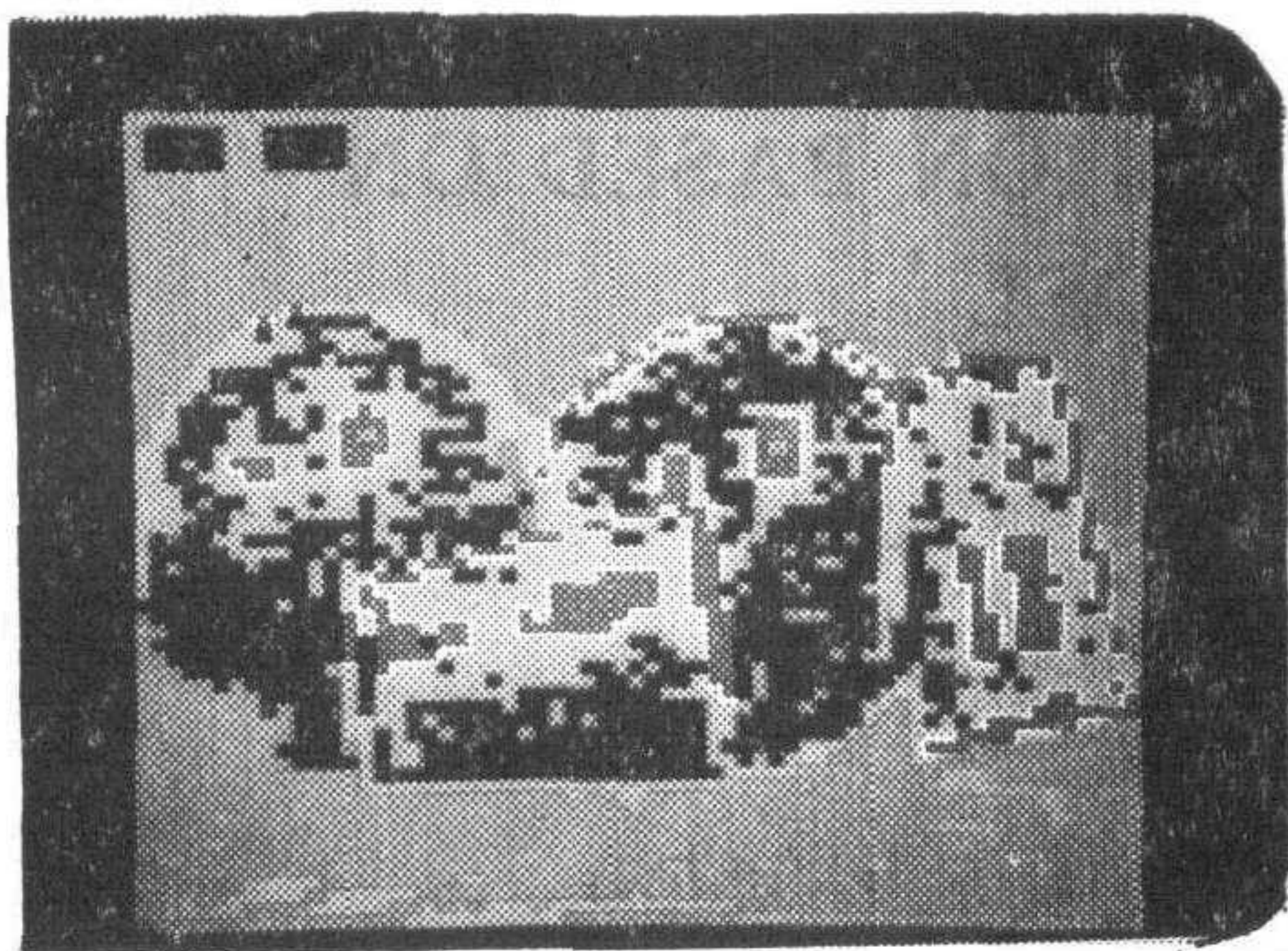
加权能使一个物体上的颜色一致性改善,但是加权系数却是随物体颜色的改变而改变的.



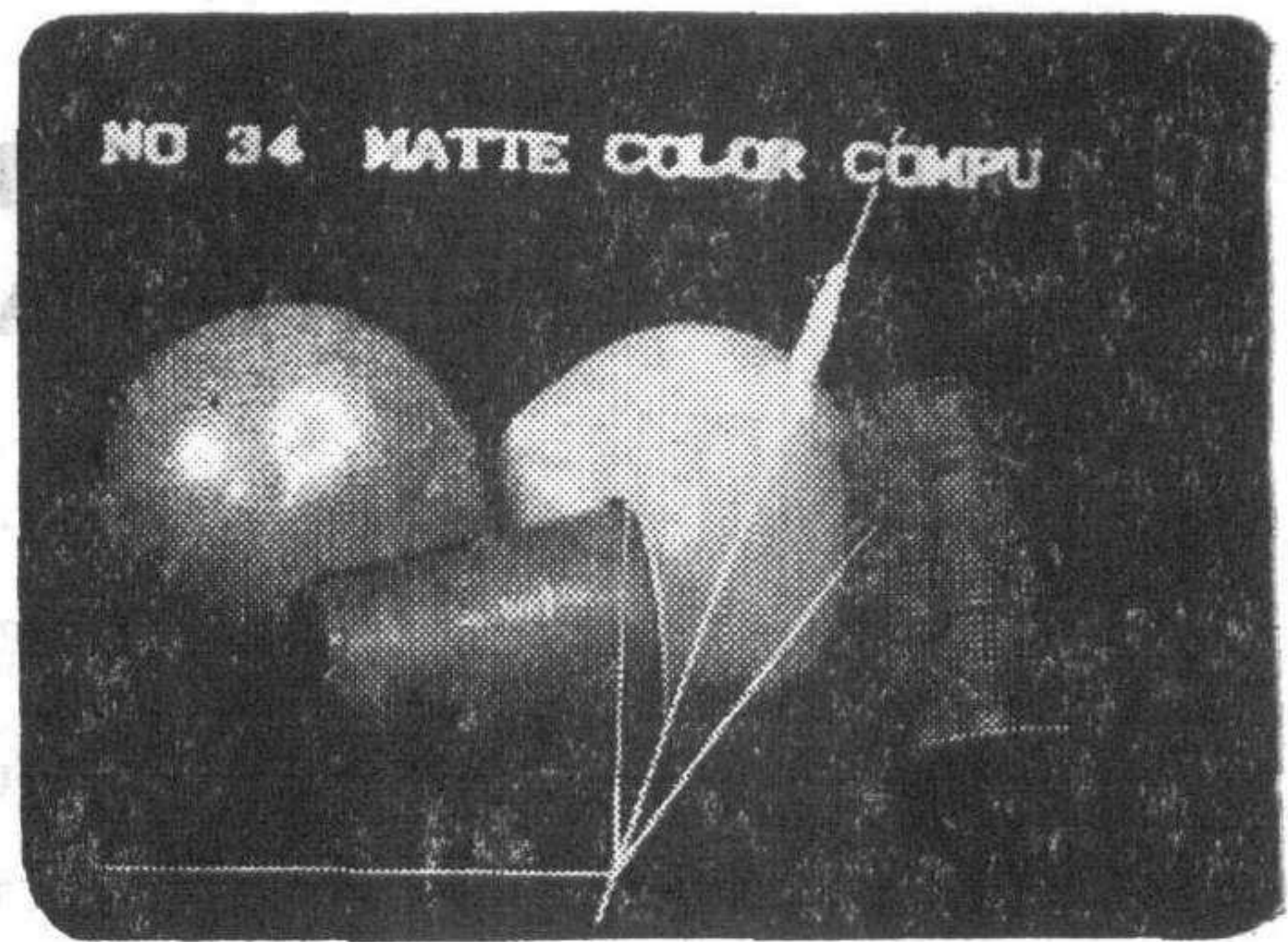
照片 1 (NO 31)



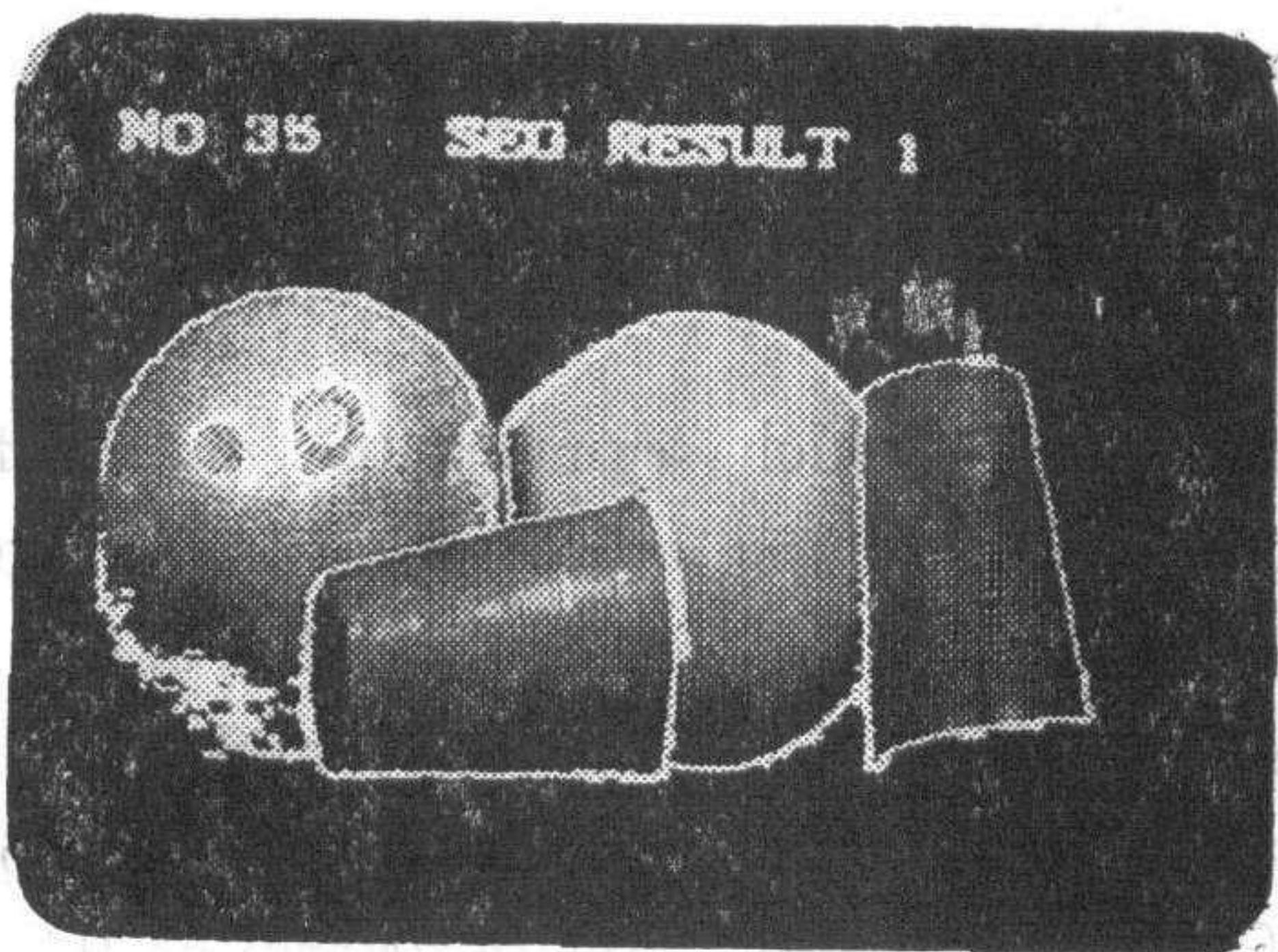
照片 2 (NO 32)



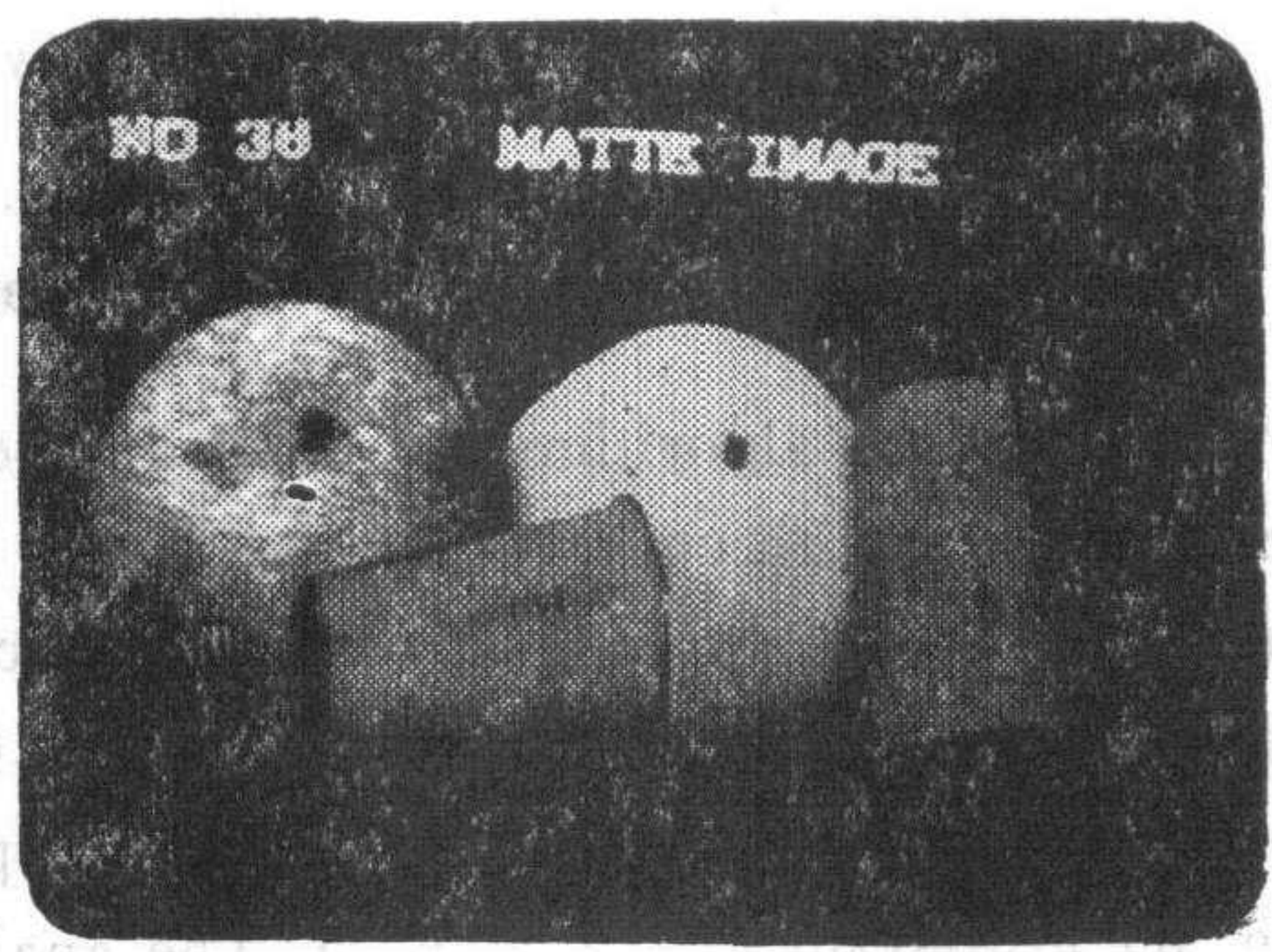
照片 3 (NO 33)



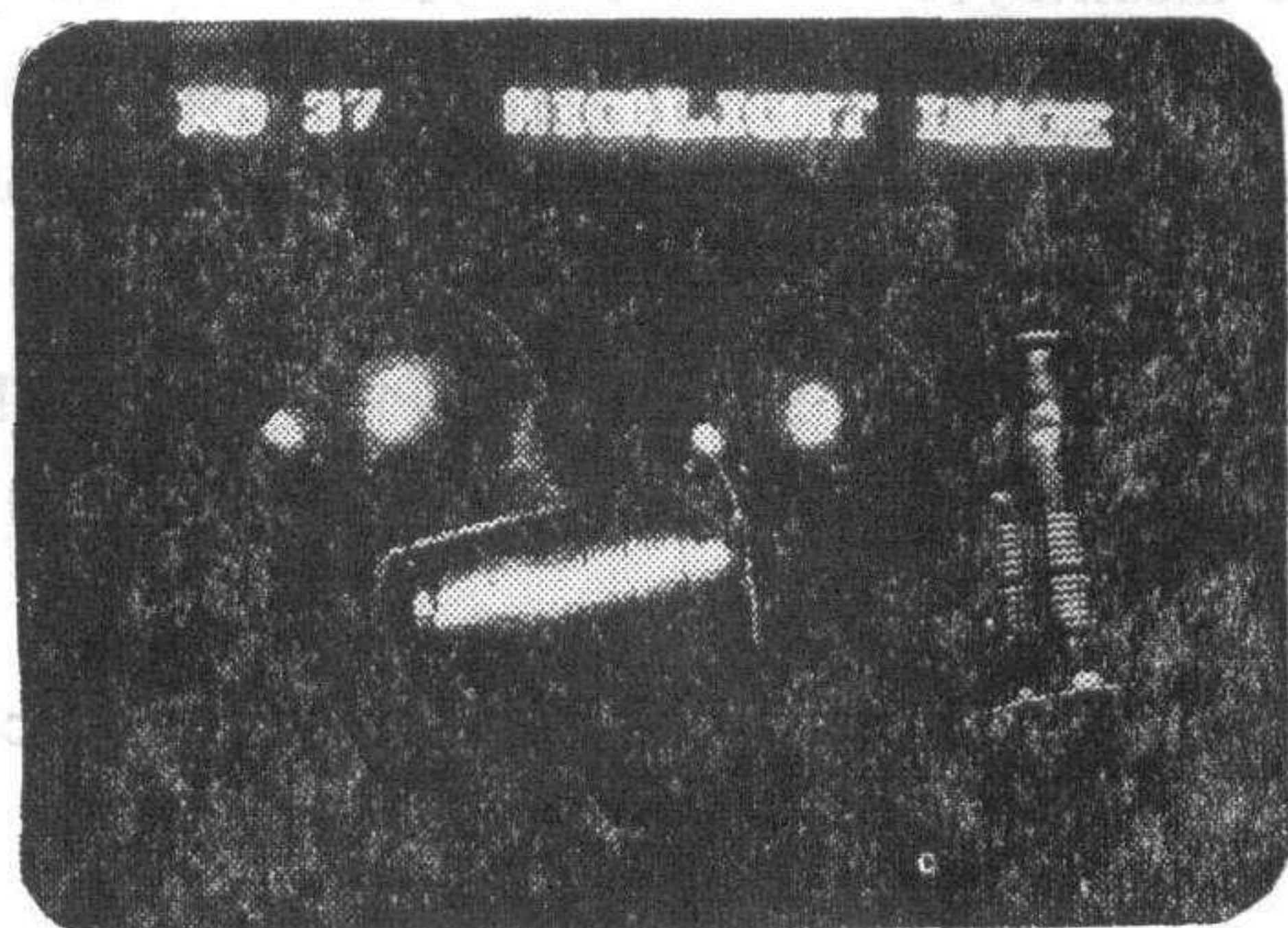
照片 4 (NO 34)



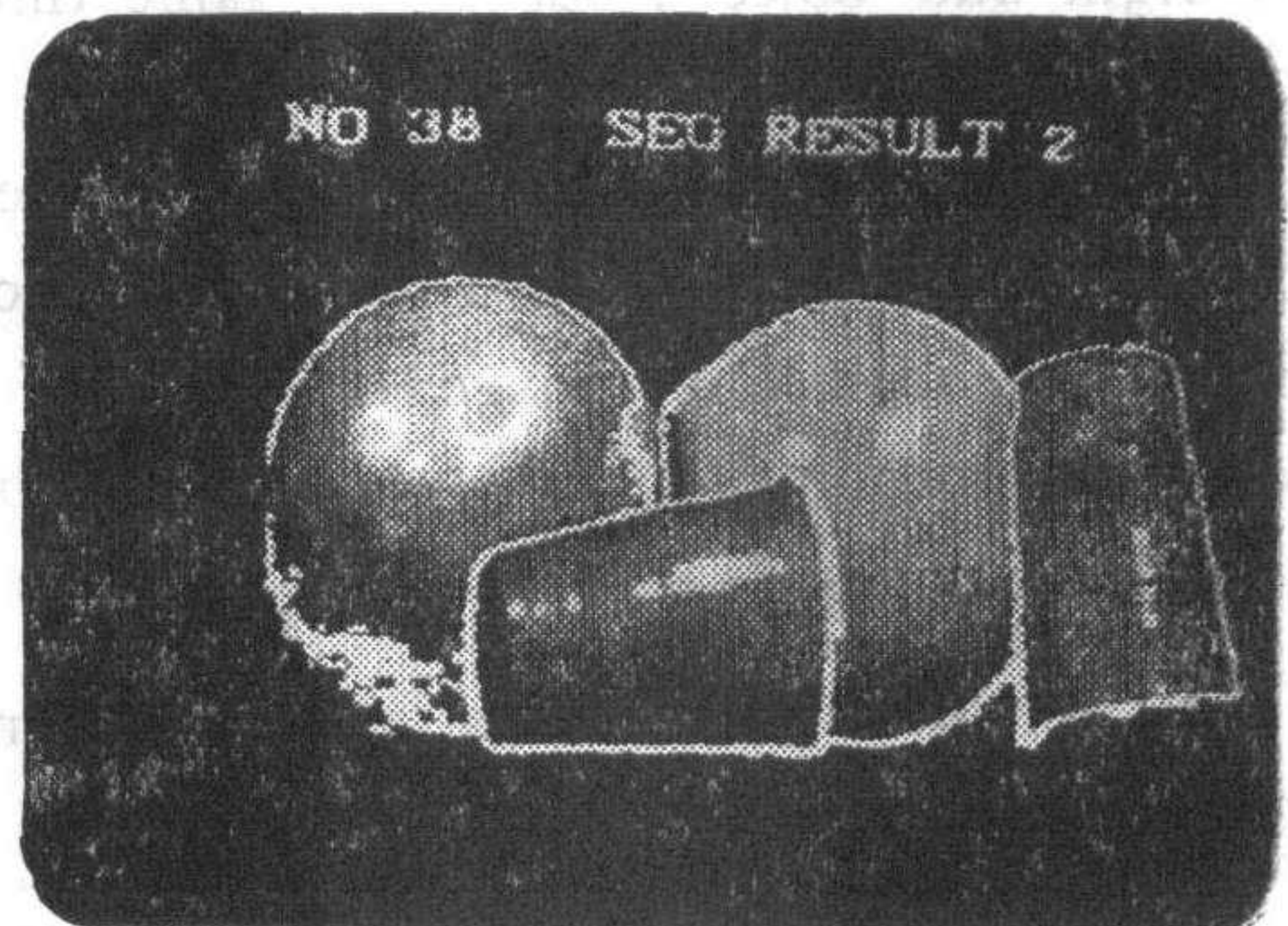
照片 5 (NO 35)



照片 6 (NO 36)



照片 7 (NO 37)



照片 8 (NO 38)



## 参 考 文 献

- [1] Klinker, G. J., Shafer, S. A. and Kanade, T., The Measurement of Highlight in Color Images, IJCV, (1989), 2,7—32.
- [2] Klinker, G. J., Shafer, S. A. and Kanade, T., A Physical Approach to Color Image Understanding, IJCV, (1990), 4,7—38.
- [3] Allan, R. G., Jepson, D. and Tsotsos, J. K., Highlight Identification Using Chromatic Information, Proc. of the Int. Conf. on Computer Vision, (1987), 161—170.
- [4] Klinker, G. J., Shafer, S. A. and Kanade, T., Using a Color Reflection Model to Separate Highlight from Object Color. Image Understanding Workshop, (1987), 614—618.
- [5] 荆其诚等,色度学,第一版,北京,科学出版社,1979,69—130.
- [6] 丁万鼎等,概率论与数理统计,第一版. 上海,上海科技出版社,1988,450—503.
- [7] 黄玉明等,彩色图像中颜色不变性与耀斑的分离(I)(II). 光学学报,(1991),11,1041—1048.

## COLOR IMAGE SEGMENTATION BASED ON PHYSICAL MODEL

HUANG YUMING

(Beijing Institute of Control Engineering, 100080)

XU GUANGYOU

(Computer Science Department, Qinghua University, 100084)

YE PEIJIAN

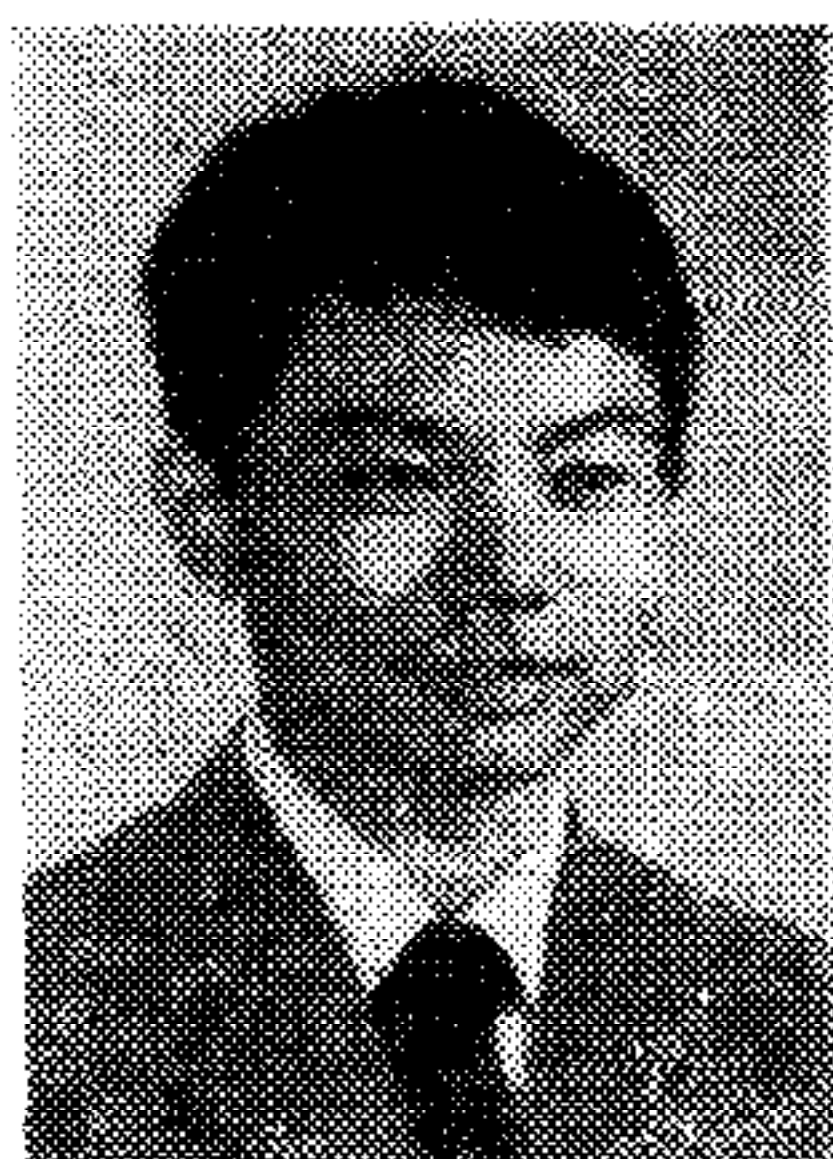
(Chinese Academy of Space Technology)

### ABSTRACT

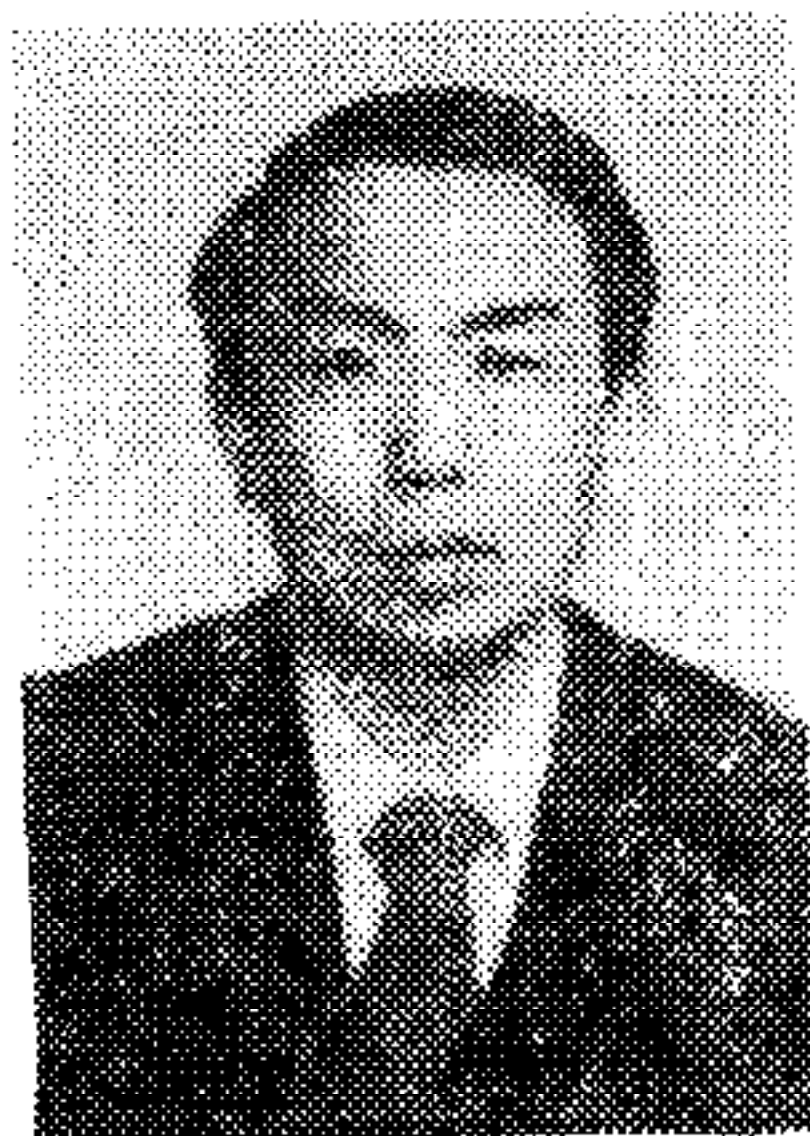
We present an algorithm for color image understanding, which segments the image after analyzing surface with color variations due to lighting condition and object colors. The work is based on a theory—the Dichromatic Reflection Model—which describes the color of the reflected light as a linear combination of light from surface reflection (highlight) and body reflection (object color). A peculiar cluster shape (skewed T) is formed by color pixels of an object area in 3D histogram in color space. The analysis of cluster property helps to determine the color of light and objects, but at the same time, the meaningful cluster is generated by the projection of certain object area of the image. According to the strategy of hypothesis and test, following the continuity of the image and the feature of color clusters, the algorithm completes image segmentation and gives forth the physical description of imaging process, including intrinsic images, segmented image, the color of light and objects. Reflecting respectively the properties of light condition and every object, both the matte image and highlight image compose the intrinsic images.

**Key words:** Dichromatic reflection model; intrinsic image; color image analysis; color image segmentation.





**黄玉明** 一九六五年三月生于河南省民权县。一九八〇年九月开始在北京大学计算机科学系软件专业学习，一九八四年毕业，一九八六年七月在该系研究生毕业。一九八六年八月在航天部五〇三所工作，一九九一年获得航天部五〇二所自动控制理论与应用专业博士学位，留所工作。目前从事机器人视觉方面的工作。研究兴趣包括彩色图像的分析与理解，定性视觉等。



**徐光祐** 1963年毕业于清华大学自动控制系，并留校任教，1982—1984年在美国Purdue大学电机系从事模式识别和人工智能研究，并与K.S.Fu教授等合著“人工智能及其应用”一书。他所领导的研究组曾获1985年国家科学技术进步二等奖。现任清华大学计算机科学与技术系教授，信息处理与应用教研室主任，国家高技术智能机器人主题机器人视觉专题专家小组成员。发表了多本学术著作和数十篇论文。研究兴趣为计算机视觉，人工智能和多媒体计算机技术等。



**叶培建** 一九四五年一月出生于江苏省泰兴县。一九六八年毕业于浙江大学无线电工程系，从事空间工作。一九七八年开始读研究生。分别在一九八三年、一九八五年于瑞士获工学博士和科学博士学位。现在中国空间技术研究院从事计算机应用和卫星应用工作，职称为研究员，同时在南京航空学院任兼职教授。研究方向为人工智能、模式识别、图像处理、CAD等。在国内外杂志及学术会议上发表论文三十余篇。