|  |
| --- |
|  |
| 裸眼3D显示与可见光隐身 |

张力平（青岛双桃精细化工有限公司 山东青岛 266071）

摘要：提出一种理论，可直接在空间形成一个三维的像，实现动态三维显示，用于三维显示器和立体电视；还探讨了利用在空间显示三维图像再现被人身体挡住的周围背景景象来进行可见光隐身，用于隐身衣。

关键词：裸眼3D显示；三维显示器；立体电视；可见光隐身；隐身衣；

引言：目前三维显示有佩戴特殊眼镜的方法和裸眼3D显示。佩戴特殊眼镜肯定是落后技术；裸眼3D显示各种方案都结构复杂成本高效果差。例如裸眼3D显示方案中的一种体三维显示技术，显示的立体图像的距离和最大尺寸受显示器体积限制，比如要显示远处高大楼房，体三维显示技术就无能为力了。而视差显示和全息显示技术也存在很多问题，并不理想。本文提出的三维动态显示方案硬件相对简单，只是软件相当复杂，更易实现大视场，真彩色，高清晰度立体活动图像的完美显示，且显示器可做得很大又很轻薄。至于可见光隐身的实现，虽然目前有人提出用左手性负折射率超材料做隐身衣，使光线从身体绕行来实现，但可见光含有很多不同频率的光波，负折射率材料对它们的偏折率不同，导致负折射率材料隐身衣产生色散现象而无法真正隐身，只能在单一频率光波条件下隐身[1]，而本文提出的可见光隐身方案不存在此问题。

该设想的依据是电磁理论中的唯一性定理（证明见附录），定理表述为： 有界区域内，如果时电磁场的初值处处已知，并且在t≥0时区域的边界上的电场的切向分量或磁场的切向分量也是已知的，那么在t>0时区域中电磁场就由麦克斯韦方程唯一地确定了[2]。

因为光是电磁波，所以光场也应该符合唯一性定理。

下面探讨利用唯一性定理成像的原理：



如上图：水平线表示一个假想平面。假想的S曲面是空间边界的封闭曲面的一部分，V内是S面和xy平面共同封闭的空间。假设在面下方有一物体，发出光波在空间制造一个变化的电磁场，设其电场为。面由方程确定，物体在面上激起的电场为。现假定不存在，而我们在≥0时在面上复制沿面切向方向的切向分量，根据电磁理论中唯一性定理，这时在空间的电磁场与存在时的电磁场相同，因为空间电磁场在边界条件相同时由麦克斯韦方程唯一地确定了，所以两者相对于空间的观察者完全等效，即存在时与不存在时在面复制对于空间的观察者完全等效，所以在不存在时，我们在≥0时在面上复制，则在空间就能产生一个好像存在的光场，人在空间观察S面就能看到O的立体的像。否则如果人看到不同于O的像，那意味着麦克斯韦方程有两组解，违背了唯一性定理。

上述原理的成立，要保证物体发出的电磁波（光波）在时在空间中造成的场为0，否则违背唯一性定理。可以假设在面下方紧贴面有一假想薄膜，这一薄膜在时不透光，在≥0突然变透明可透过物体的光波。在中观察者看到的就是这一假想情形。假想的面可称为“虚拟屏幕”，若每秒内虚拟屏幕放映24帧以上的连续静止立体像，立体像就会动起来，这就是三维显示器或立体电视的显示原理。

为了在面上复制，首先要知道物体在面上激起的电场，为此只需用一个有视差的多镜头摄像机把物体拍摄下来，形成几个有视差的图像，再用计算机对几个图像的像素逐一分析计算 ，计算出物体的位置形状亮度色彩等，再据此推算出物体发出的光场，进而计算出物体在面上激起的电场，然后再在另一个要显示的地方建立假想面并在面上复制，就可以在没有物体的地方显示出物体的立体像。

为了复制面电场，在面下放一个阵列，这个阵列由很多单元排列组成。如下图：



每个单元结构如下：



入射光为，通过两块调制材料和透镜射出。计算机发出的两组控制信号将入射激光调制成，Ai和φi各为设定的幅值和初相位。不同单元入射光源偏振方向可作不同设置，使面电场矢量各个方向都有分布。由波的叠加原理[3]可知，所有单元发射波场在面以矢量和的方式叠加形成合成矢量场。每个单元透镜上表面做成平面，以便把光散射到平面上方所有空间。要成像，还需在图上xoy平面封闭线内设挡光黑幕，挡住别处光的干扰。

根据唯一性定理，若空间中电磁场在时唯一确定，那么在t≥0时边界上的电场或磁场的切向分量必须唯一确定，且时空间的电磁场初值处处确定，这里存在一个问题，如下图所示：

所有单元同时发射波，波到达面的时间有早有晚，只有离面最远单元的波也到达时，在面上所有的波才能到齐，设这个时刻为，我们将时阵列的波所造成的空间V的场为。我们仅需复制的以后的波，当t≥t0时使时，但考虑到的干扰，我们只能复制。这是因为时中的场为如果假想薄膜不发射假想的则违背唯一性定理，即复制场包括假想薄膜发射的假想场。即在t≥t0时，在中有场（这里只讨论电场，磁场同理）。只是在视线中出现的时间只有几亿分之一秒，无法察觉，可以忽略。



我们可以在要显示的物体上取要显示的点作为立体像素，而立体像素不论是什么色彩，都可用红绿蓝三基色的不同组合来等效。因此只需在红绿蓝三个频率在面复制场就可以了。因为在物体的三基色等效像素激起的电场中，是只有这三个频率的正弦分量的叠加。

在S面共取n个点（可称空间点），复制其上的场。当然S面上n个空间点之间的场也要复制，但如果相邻两空间点间距远远小于三基色光波在S面上沿曲面分布的波长，相邻空间点之间的场（复制场和物体激起的场）就可以认为是线性分布和线性过渡的。所以只要将空间点上的场精确复制，S面上空间点之间的场就自然也被复制了，前提是相邻空间点的之间距离远小于三基色光波在S面上沿曲面分布的波长。

物体发出的波场某一时刻在充分小尺度下的分布一般是线性的，但在个别局部会有突变，如在几个物体光波互有遮挡的光场中，但当空间点间距极小时，我们可以用场相邻空间点之间的线性过渡来近似实际的场相邻空间点之间的突变，用以显示物体波场的局部线性过渡近似物体波场的局部突变，人眼很难发觉两者有差别。

以某个固定频率0考虑问题，物体在S面某点P激起的场是物体上所有立体像素对P点激起的场的矢量和。把所有矢量场分解为x,y,z方向三个分量。因为频率固定，所以在一个方向上P点总场复振幅是所有立体像素对P点激起的场的复振幅的复数和[3]。一个立体像素对P点的复振幅可表示为：

所有立体像素对P点的场求和的总场的复振幅表示为

=

= 同理Pm点总场复振幅可表示为

当透镜入射光为单色相干线偏振平面波时，考察透镜入射光和出射光之间的关系。首先入射光频率等于出射光频率。其次出射光每个点波的振幅正比于入射光波振幅。因出射光每个点波场x,y,z三个方向的分量振幅正比于该点场振幅，所以每个点波场x,y,z三个方向的分量振幅正比于入射光波振幅。

设入射光波一个波峰从透镜附近某个等相位波平面上出发，出发时刻为t0，波峰经过空气介质和透镜介质到达出射光某点P，路上花的时间为，则波峰到达P点的时刻为t0+。若光波在出发点相位变了，波峰迟后了∆t时间出发，则波峰出发时刻为t0+∆t，花同样时间到达P点，波峰到达P点时刻为t0+∆t+，所以波峰到达P点的时刻也迟后了∆t。P点波场相对时间的函数沿时间轴平移∆t距离，因入射光出射光频率相同，所以P点光相位也改变与入射光同样的值。入射光相位改变引起出射光每个点波到达时间的迟后（或提前），引起出射光每个点相位同样改变，而出射光每个点x,y,z三个方向三个分量相位也改变同样的值。

综上所述，当入射光为单色相干线偏振平面波时，透镜出射光每个点场的x,y,z三个方向三个分量与入射光之间的关系为：

1. 频率相同。
2. 振幅成正比。
3. 入射光相位改变引起出射光每个点场三个方向分量相位相同改变。

考察阵列中一个单元一个透镜，当第i个单元透镜入射光在透镜入射侧某点为cos时

出射光在P点场分解为

由透镜入射光与出射光之间的关系推出，当第i个单元入射光为被控制信号调制过的时，出射光在P点的场为

令

第i个单元对P点造成的场的复振幅为

exp(j

同理，我们可求出第i个单元对Pm点造成的场的复振幅。

exp(j

其中m为Pm点上标不是指数。 的含义是当第i个单元透镜入射光为cos(-ωt)时，第i个单元对Pm点造成的场x,y,z三个方向分量的三个复振幅。

在ω0频率，要在S面上P1 P2……Pm……Pn这n个空间点上复制S面上的场，可在阵列上设3n个入射光同为ω0频率的单元，Pm点的场的x,y,z三个方向三个分量的复振幅是所有3n个单元对Pm点造成的场x,y,z三个方向三个分量的复振幅的在x,y,z三个方向上的复数和（在所有单元频率相同情况下）[3]。

在P1点：

在P2点：

在Pm点

在Pn点

使 求解

列方程

求解上列3n×3n复数方程组，解出S1,S2…Si…S3n，令 ，

Ai φi即为所求。用A1，φ1 A2，φ2……Ai，φi……A3n，φ3n作为控制信号调制每个单元入射光的幅值和相位，从而复制 S面n个空间点电场，进而在一个频率上复制整个S面电场。如果要在红绿蓝三个频率上复制S面n个空间点的场，就要把单元数量扩大3倍，同时要用3个频率的单元入射光源来形成空间场。每个频率的单元数量为3n个，所有单元数量一共9n个。因为空间点间距要求极小，所以n极大，单元数量极多，要在尽量小有限面积上安装如此多的单元，单元尺度要非常小，一个单元的尺寸最好能做到接近几个纳米。

上述过程只是形成了一个静止的立体像，而要形成一个活动的立体像，要在每秒内重复上述过程至少24次以上，以形成连续立体像。这个过程中的数学求解在实际中可用计算机软件实现，用实时控制计算机在软件的帮助下用控制信号实时控制每个单元以呈现活动立体像。因在极短时间内计算量非常大，对计算机运算速度提出了极高要求。

这种三维成像系统除了可用于三维显示器，立体电视以外，还有一个更有价值的应用，即实现可见光隐身。下图说明可见光隐身衣的原理，三维图在纸上表达困难，这里用二维图来示意说明：



上图中阴影部分代表要隐身的物体O，A,B,C,D代表几个阵列，由计算机控制用以成像，ab,bc,cd,da线段是代表几个阵列的假想平面xy，其交线在a,b,c,d。SA,SB,SC,SD为假想的曲面和虚拟屏幕，SA曲面与A阵列假想xy面交于d,a；SB SC SD以此类推，SA SB SC SD共同构成的S面即虚拟屏幕。如果这个屏能在任何角度把身后被O挡住的那部分的背景的立体图像显示出来，且物体O表面全黑将所有入射光波全部吸收掉，即可达到隐身目的。因为物体O和周围背景都可能在运动变化，所以虚拟屏幕S的显示要和物体O与周围背景运动变化同步，以模拟一个与O不存在时一模一样的光场。此时，如果将O做成人的服装，穿上此服，人就消失不见了，这便是隐身衣。

为达此目的，需获知隐身衣外面环境背景光场和隐身衣的位置形状信息，可在隐身衣上周围表面安装若干立体摄像机将范围内环境背景拍摄下来，传送给隐身衣内的计算机，计算出周围环境背景光场，再将隐身衣的形状信息输入计算机，计算机算出被隐身衣挡住的周围环境背景光场，再指挥控制隐身衣上的三维成像系统将被挡光场利用S面虚拟屏幕重现出来，把被隐身衣挡住的光完整复制出来，实现可见光隐身。S面虚拟屏幕成像过程与前文所述三维立体显示器与立体电视原理相同。如下图所示：



若隐身衣由柔软材料制成，材料的变形使计算机无法精确计算出隐身衣的轮廓及其挡住的光场。所以材料只能是刚性的，而装有角度传感器关节可自由活动，计算机根据关节角度数据和存储器中隐身衣外形数据就能计算出隐身衣的精确外形。

隐身衣系统应该将所有周围环境背景都拍摄下来，但有时周围环境背景被隐身人自己身体挡住，形成“死角”。例如当隐身人站在地面上他的脚将地面挡住，脚下的地面就是“死角”，是隐身衣上的摄像机无法拍摄的。解决办法：计算机随时将周围环境中离隐身衣很近的场景图像数据存储起来，一但出现“死角”，计算机马上根据死角的位置从存储器中调出事先存储的“死角”部分图像数据信息，经视角变换后进行显示来填补被挡部分光场。

立体像素要被至少两个摄像机镜头拍摄到才能完成位置定位，被至少一个摄像机镜头拍摄到才能提取色彩亮度信息，从而将立体像素显示出来。



这里存在一个问题，上图中立体像素无法被隐身衣上标出的摄像机镜头拍摄到，是个无法显示的盲点。要避免这种极端情况，隐身衣上摄像机镜头分布要有一定密度，大量布置在隐身衣表面。这就要求摄像机是微型的。

还有一个问题如下图所示：

上图中 O是立体像素，B,E是摄像机镜头，弧ABCDE是隐身衣的一段边缘轮廓线。左图两条虚线间的立体像素O因障碍物遮挡无法被普通摄像机镜头拍摄到，右图中将摄像机镜头改成凸起的鱼眼镜头，能拍摄位于障碍物后两条虚线之间的所有立体像素，从而消除位于障碍物后两条虚线间的盲点，又能在大于角度范围拍摄立体像素点。当然鱼眼镜头摄像机拍摄的图像要经过计算机进行图像数据预先处理。



如果将隐身衣显示器安装在隐身人头盔上，会增加头部重量和惯性，并使头盔重心过高，加重隐身人颈部的压力和负担，且头盔上面积和空间有限不方便安装显示器。更合理的设计是避免将显示器安装在头盔上，而将其转移到其他更方便的位置。如下图：

图中A点和B点为显示组件阵列。AO，BO 为阵列的xy面，O为A,B两阵列xy平面的交线，S面为虚拟屏幕。如果将显示组件及其阵列安装到A点和B点等处，就比安装在头盔上更为合理。



因为隐身衣上的摄像机必需是微型的，摄像机内的 CCD 光电转换器件也要是微型的。但这样一来 CCD 器件感光像素单元数量受微小空间限制不能很多，拍摄图像的像素数量不能很多，这就限制了摄像机拍摄的图像分辨率。解决办法是取消摄像机内 CCD 器件，只保留摄像镜头。将每个镜头成的像用一根自聚焦光纤连接传送到后背箱内透镜组件上，透镜组件将单根自聚焦光纤传送来的图像先放大再成像到后背箱内面积更大的 CCD 器件上。面积更大的 CCD 器件可容纳更多感光像素单元，使拍摄图像像素数量大大增加，提高了每个镜头拍摄的图像的分辨率，使图像分辨率不受太大限制，所以更为合理。

可见光隐身系统硬件系统如下：

可见光隐身系统软件系统如下：



可见光隐身系统的关键技术有：

1. 研制能在小于1/24秒时间内在给定信号控制下分别精确定量改变入射激光幅值和相位的两种材料，应用在阵列单元上用来做光波调制。
2. 纳米光学元器件的大规模制造。隐身衣上的显示器阵列要求能在尽量小的面积上集成数量巨大的单元微光学器件，每个单元光学器件尺寸最好能接近几个纳米，目前最小元器件的尺寸只能做到22纳米。这要靠纳米加工工艺的进步。
3. 研制体积小重量轻的便携式超高速计算机。隐身衣上要携带超高性能计算机，目前的巨型计算机虽然有超高计算速度，但体积和重量太大无法随身携带。目前笔记本电脑或单片机以及嵌入式系统处理器虽能随身携带，但计算速度根本达不到隐身衣系统要求。可能需要专门研制量子计算机才能达到要求。
4. 隐身衣系统计算机系统需要开发超高复杂度大型软件系统，这可能只有大型软件企业才能做到。

附录：唯一性定理的证明：

利用反证法，考虑被封闭面包围的空间区域,设满足麦克斯韦方程初始条件和边界条件的电磁场不唯一，那么至少有两组解，记为 和 ，设差场为 (1-a) (1-b)。那么在t=0时空间区域V中差场，在t≥0时区域V的边界上差场的切向分量或的切向分量为零并且差场满足麦克斯韦方程

应用矢量恒等式

将式（2-1）代入上式，并对等式两边在区域V中进行体积分，利用高斯定理将等式左边的体积分化为面积分得：

上式两边在时间t=0至t(t>0)内积分，考虑差场的初始值为零得：

上式右边第一项的被积函数总是大于等于零，因此其积分结果也总是大于等于零的数，所以可得：

考虑矢量恒等式，上式右边被积函数为：

在给定的边界条件下上式等于零，因此式（2-4）的右边等于零。

所以式（2-4）变为：

由于上式的被积函数总是正值，因此要使上式成立，必有

即,这就是说，满足初始条件和边界条件的有界区域中麦克斯韦方程的解是唯一的。

参考文献

[1]陈焕阳.各向异性材料中的波：隐身衣、旋转衣和声子晶体.上海交通大学博士学位论文，2008.

[2]傅君眉，冯恩信.高等电磁理论[M].西安交通大学出版社，2000.

[3]蔡履中，光学[M].北京：科学出版社，2007.

作者简介：姓名：张力平 男 出生日期：1971.11.9 汉族 籍贯：山东青岛 学历：本科 职称：工程师

研究方向：物理，裸眼3D

联系方式：通讯地址：山东省青岛市市南区泰兴路1号4单元601户 邮编266071

电话18916373031 电子邮箱zhanglp2ww@163.com