

影视特效 镜头跟踪技术精粹

Invisible Art of Camera Tracking

李伟 编著

(第2版)



随书附赠 **DVD9** 光盘，提供 **126** 分钟视频教程

光盘容量总计 8 GB，内容包括 boujou 和 PFTrack 的软件参数讲解和基本操作视频教程，书中所有案例的场景源文件、镜头素材以及项目工程文件，此外还有高清级别的现实案例镜头以及特别提供的 Timeaxis 精彩视效 demo，以供鉴赏。



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

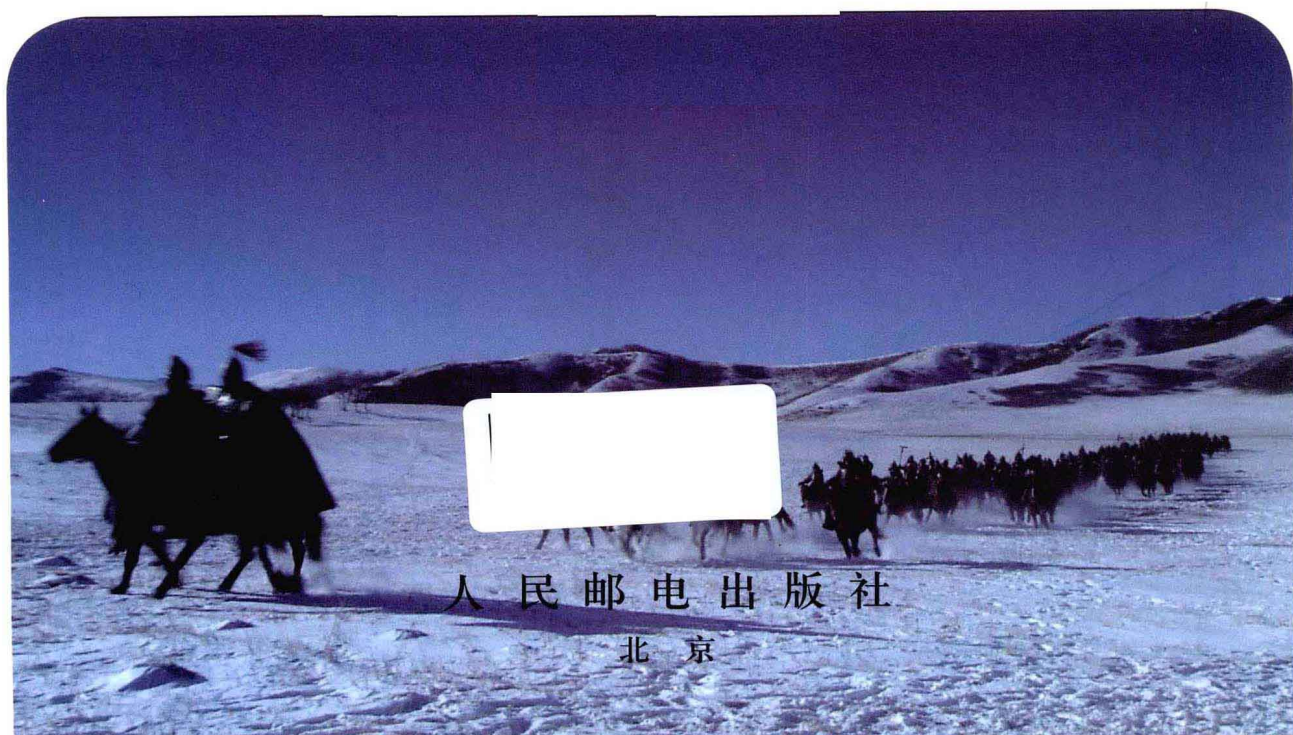


影视特效 镜头跟踪技术精粹

Invisible Art of Camera Tracking

李伟 编著

(第2版)



人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (C I P) 数据

影视特效镜头跟踪技术精粹 / 李伟编著. -- 2版
— 北京 : 人民邮电出版社, 2014. 1
ISBN 978-7-115-33306-3

I. ①影… II. ①李… III. ①电影特技—图象处理
IV. ①J916-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第237834号

内 容 提 要

本书是国内第一本全方位介绍镜头跟踪体系的教材, 由国内一线视效公司的资深运动匹配师撰写。

全书共 16 章, 介绍了影视特效领域中的镜头跟踪流程, 以及 boujou 和 PFTrack 这两款跟踪软件的使用方法; 并详尽剖析了影响镜头跟踪质量的相关因素, 提出了对应的解决方案; 完整而系统地给出了学习镜头跟踪的方法, 填补了国内空白。

本书附带一张 DVD9 高清多媒体教学光盘, 内容包括 boujou 和 PFTrack 的软件参数讲解和基本操作视频教程, 书中所有案例的场景源文件、镜头素材以及项目工程文件, 此外还有高清级别的现实案例镜头及特别提供的精彩视效 demo 以供鉴赏。

本书适合大专院校影视传媒相关专业的师生, 广大的 CG 爱好者, 尤其是想进入和正在从事影视特效工作的初中级读者阅读。对于具有运动匹配经验的业内人士, 同样具有很高的参考价值。

◆ 编 著 李 伟

责任编辑 王峰松

责任印制 王 玮

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

北京捷迅佳彩印刷有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 20.25

字数: 518 千字

印数: 3 001-5 500 册

2014 年 1 月第 2 版

2014 年 1 月北京第 1 次印刷

定价: 128.00 元 (附光盘)

读者服务热线: (010) 81055410 印装质量热线: (010) 81055316

反盗版热线: (010) 81055315

广告经营许可证: 京崇工商广字第 0021 号

第1版 序

运动（包括被摄体运动和摄影机运动）是影视创作的灵魂。

在数字影视特技制作中，将三维软件制作的元素“放置”到真实的场景里是最常见的手段之一。早期的数字特技大多采用固定镜头的方式来回避一个技术上的难题——运动跟踪与匹配。究其原因，是前期拍摄的复杂性和不确定因素使三维运动匹配变得异常复杂。作为一名特效总监，我不止一次被这样的问题困扰，它成为制约创作的一个重要的瓶颈。

以boujou/Matchmover为代表的运动匹配软件的出现，很好地解决了这个问题，使数字影视特技在运动镜头的创作上更灵活，效果也更出色。本书作者在“时光坐标数字影像”工作多年，具有极其丰富的影视制作经验。作者精心挑选出自己参与制作的经典实例（如《大风歌》等），结合理论与实践技巧，详尽地阐述了运动跟踪与匹配技术在前期拍摄和后期制作中需要注意的各种问题。本书理论基础扎实，案例具备典型性，由浅入深地引导读者逐步了解运动匹配技术在数字影视特技制作中的知识、经验和技巧，是一本影视特技从业人员必读的实用教材。

浙江传媒学院动画学院副院长

陈 奕

时光坐标数字影像总经理

2010年6月于杭州

本书内容丰富，结构清晰，技术参考性强，讲解由浅入深循序渐进，相关案例大多来自杭州时光坐标公司的现实项目，贴近实战。非常适合广大CG爱好者，尤其是想进入和正从事影视特效工作的初、中级读者阅读；对于具有运动匹配经验的业内人士，同样具有很高的参考价值。同样的主题，站在一个全新的角度，相信你会看到不

一样的内容。

心有所得而不吝惜与人，士子本色也。今汇编成册留书于世，读者若能从中有所收获，幸甚幸甚。参与本书编写的，还有曹燕、方容、段炼、唐春丽、胡曙光、梅德忠、冉军、程荣、佘虎、肖渊、王军、魏露平和周肖。在此表示感谢。

李伟

2013.06.30

目 录

第1章 运动匹配概论	1
1.1 什么是运动匹配	1
1.2 一次典型的运动匹配	3
1.3 运动匹配的工作体系	5
1.4 运动匹配在视效生产线上的定位	11
第2章 匹配静止的镜头	12
2.1 教程：静帧透视匹配	12
2.1.1 收集场景数据	13
2.1.2 设置摄像机	15
2.1.3 添加环境几何体	17
2.1.4 创建摄影机系统	19
2.2 教程：使用摄影机贴图模拟镜头运动	25
第3章 运动匹配程序	32
3.1 运动匹配程序简介	32
3.2 运动匹配程序原理——照相测量法	40
3.2.1 解算	40
3.2.2 光学摄影术	41
3.2.3 投影	42
3.2.4 建立摄影机	44
3.2.5 视差	48
3.3 运动匹配程序的使用	50
3.4 教程：boujou的基本用法	51
第4章 2D跟踪（2D Tracking）	60
4.1 2D跟踪的过程	60
4.1.1 解剖一次2D跟踪	61
4.1.2 跟踪点的放置要点	62
4.1.3 获取有效的跟踪	64
4.1.4 镜头画面对2D跟踪的影响	67
4.1.5 镜头的预处理	74

4.2 教程：2D跟踪	74
4.2.1 评估镜头	75
4.2.2 在boujou中放置跟踪点	77
4.2.3 选择合适的跟踪点	79
4.2.4 添加其他的跟踪点	79
第5章 3D解算	81
5.1 怎样才是一个“好”的解算？	81
5.2 解算摄影机	82
5.2.1 选择合适的设置	83
5.2.2 教程：解算摄影机	84
5.3 评估解算	86
5.3.1 评估3D参考点	86
5.3.2 评估3D空间	87
5.3.3 渲染运动匹配结果	88
5.4 摄影机运动与3D解算	89
5.5 教程：设置坐标系统并输出场景	92
第6章 自动跟踪	99
6.1 自动跟踪简介	99
6.2 编辑自动跟踪	100
6.3 使用遮罩（Mask）	103
6.4 自动跟踪的优势	104
6.5 教程：使用boujou进行自动跟踪	105
第7章 环境匹配设置	113
7.1 放置摄影机	113
7.2 检查运动匹配	114
7.2.1 引入代理物体	114
7.2.2 棋盘格纹理检查	115
7.3 匹配环境	116
7.4 教程：设置环境匹配	119
7.4.1 添加测试几何体	121
7.4.2 给物体添加纹理贴图并匹配测试	125
7.4.3 在环境中放置匹配过的数据	127
7.5 更改坐标系统	130
7.6 提交场景	131

第8章 摄影机	133
8.1 胶片摄影机的工作原理	133
8.2 镜头	134
8.2.1 焦距	135
8.2.2 焦点	137
8.2.3 节点性	137
8.3 胶片背板 (film back) 和CCD	138
8.3.1 胶片背板和焦距	138
8.3.2 数字摄影机	139
8.3.3 使用摄影机信息	141
8.4 视频格式	142
8.5 镜头畸变	145
8.6 视频的数字化	149
8.7 小结: 影响运动匹配的视频元素	150
第9章 拍摄现场的控制	152
9.1 获取场景的信息	152
9.2 获取摄影机信息	154
9.2.1 拍摄之前	154
9.2.2 拍摄过程中	156
9.2.3 拍摄之后	158
9.3 布景中的标记	158
9.4 在现场时与他人的合作	160
9.5 建立一套运动匹配的装备	163
第10章 疑难镜头的处理和高级技术	166
10.1 如何有效应对疑难镜头	166
10.2 疑难镜头的检查	167
10.2.1 检查摄影机的运动	167
10.2.2 检查场景的位置和匹配	169
10.2.3 审视2D跟踪	169
10.2.4 检查素材的问题	170
10.3 问题诊断	171
10.3.1 参考点异常分布的问题	171
10.3.2 摄影机路径异常的问题	172
10.3.3 场景缓慢偏移的问题	174
10.3.4 运动模糊导致的问题	174

10.4 高级工具和跟踪技巧	174
10.4.1 高级2D跟踪工具	175
10.4.2 使用约束	177
10.4.3 使用参考照片	178
10.4.4 强制解算	179
10.4.5 模拟焦距	180
10.4.6 使用测量数据	181
第11章 运动匹配解算实例	183
11.1 实例1: 混合变焦镜头的处理 (1)	183
11.2 实例2: 混合变焦镜头的处理 (2)	189
11.3 实例3: 变焦摇镜头的处理	196
11.4 实例4: 广角畸变镜头的处理	203
11.5 实例5: 遮罩的合理使用	214
第12章 革新的PFTrack 2011	221
12.1 项目管理与节点化流程	221
12.2 2D跟踪的信息增强处理	224
12.3 重要的工具——焦距测量节点	226
第13章 立体跟踪	230
13.1 立体电影与立体跟踪	230
13.2 教程: 立体跟踪的基本流程	232
13.3 教程: 立体跟踪的数据优化	237
第14章 匹配运动物体	240
14.1 基本技术	240
14.2 调整模型并应对不良的数据	244
14.3 教程: 匹配演员的动作	245
14.3.1 设置摄影机	246
14.3.2 放置演员模型并设置初始姿态	252
14.3.3 分析演员身体运动	255
14.3.4 初次匹配	258
14.3.5 二次匹配及细节调整	262
14.4 使用运动匹配程序进行物体跟踪	264
14.5 教程: 跟踪运动镜头中的运动物体	267

第15章 从运动匹配中建模和基于图像的建模	272
15.1 从运动匹配中建模	272
15.2 教程：使用运动匹配数据建模	274
15.2.1 制作建筑	275
15.2.2 制作剩余的建筑	278
15.2.3 构建街道	281
15.3 基于图像的建模	285
第16章 运动匹配数据的其他用途	291
16.1 创建特殊的摄影机	291
16.1.1 扩展和增强摄影机的运动	291
16.1.2 混合匹配的摄影机	295
16.1.3 在Maya中混合摄影机	296
16.1.4 物体运动与摄影机运动的转换	301
16.2 运动匹配与背景绘制和修复	302
16.3 运动匹配与合成师的配合	305
16.4 使用运动匹配数据确定光源	308
词汇表	310
第1版后记	314

第1章 运动匹配概论

1.1 什么是运动匹配

1.2 一次典型的运动匹配

1.3 运动匹配的工作体系

1.4 运动匹配在视效生产线上的定位

1.1 什么是运动匹配

毫无疑问，如今是一个CG泛滥的时代。无论是好莱坞大片中征服了无数眼球而不露破绽的特效，还是电视剧里花样百出的场景，甚至是每天电视里重复播出的令人厌烦的广告，你都能看到CG元素被合成到画面中的例子（如图1.1.1所示）。

对此，你可能会赞叹其中模型师精细的建模工作，贴图师逼真的纹理绘制，动画师流畅的动作设定等，但是你是否意识到了，能让这些CG元素骗过你的眼睛，相信它真的存在于所营造的镜头里，其实首先应该归功于运动匹配师完美的运动匹配（Matchmoving）。任何一个需要被放置到实拍镜头中的CG元素，都必须进行运动匹配，并且优秀的运动匹配结果将是整个视效生产线得以正常运行的基础。



图1.1.1 CG元素在影视中的应用

那么什么是运动匹配呢？运动匹配也叫摄影机轨迹反求或镜头跟踪，是将CG元素的运动与实拍素材画面的运动相匹配的过程。为了更好地解释这一点，让我们先考虑一个最简单的视效合成情景。

如图1.1.2所示，这是一个平移的镜头。摄影机向左移动，相应的画面中的桌子则向右移动。现在我需要在桌子上的圆圈处放个CG的茶壶，在没有外力作用的情况下茶壶是应该静止于桌面

上的，那么通过镜头的画面上来看，这个CG的茶壶应该随着桌子一起向画面右侧移动。想象一下，如果这个茶壶没有动，或是运动的速度与桌子在画面中移动的速度不一致，你会看到什么？一只无形的上帝之手拨动杯子在桌面上乱窜，显然这不是我们想要的。



图1.1.2 CG的茶壶如何匹配画面中运动的桌子？

要解决这个问题有两个办法：一种是预先设定好摄影机的运动路径，并以数字化的方式将路径导入三维软件，这样三维软件中的摄影机将直接继承现实中摄影机的运动信息，从而获得CG杯子的匹配动画。这种解决方式称为运动控制（Motion Control）。运动控制技术能获得高精度的摄影机路径，但是对摄影机进行精确操控的电子机械设备成本高昂，且设备体积较大，对场地要求较高。摄影机运动控制技术在海外被广泛应用到电影电视中，但国内受成本限制，应用范围有限（如图1.1.3所示）。

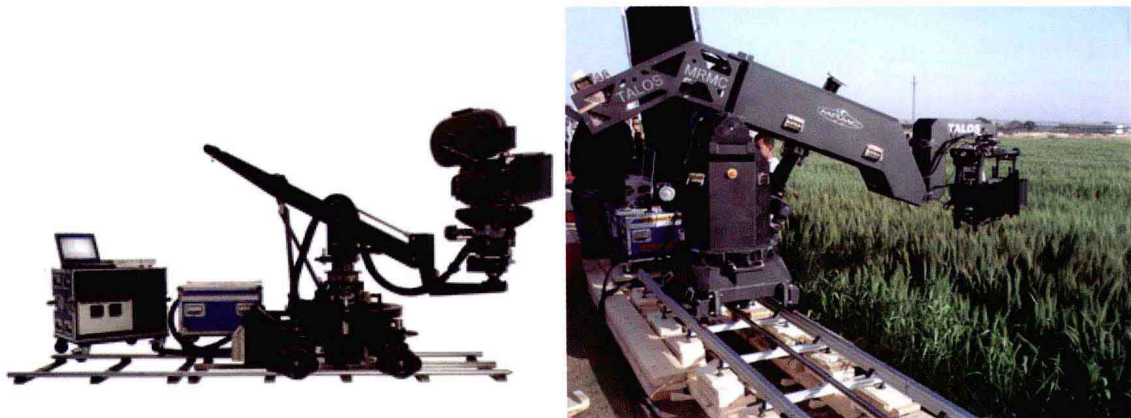


图1.1.3 使用Motion Control进行精确拍摄

另一种是直接进行拍摄，然后使用运动匹配软件采集画面的运动元素，反向求解出摄影机的运动路径和场景特征，然后将其导入三维软件，从而完成匹配工作（如图1.1.4所示）。这种解决方式称为运动匹配（Matchmoving）。运动匹配技术会依据镜头画面的不同而呈现不同的工作状态，受画面因素限制较大，但技术简单易行，成本较低，而且不受地形限制，因而在影视行业得以普及应用。实际上国内目前大部分的视效镜头都是采用运动匹配的方法进行CG元素与实拍镜头的合成。

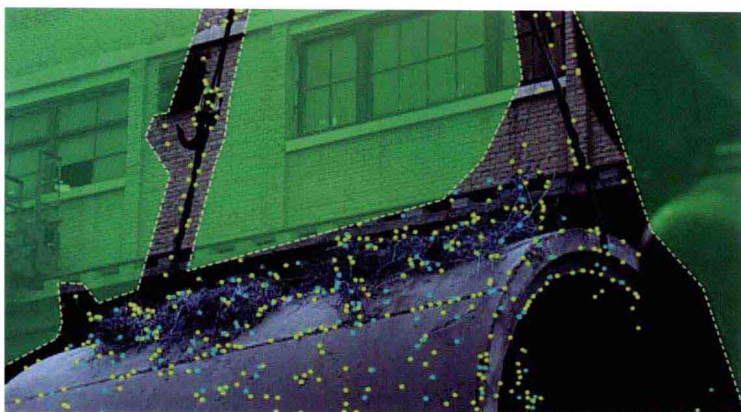


图1.1.4 使用Matchmoving解算摄影机运动

1.2 一次典型的运动匹配

一次典型的运动匹配，包括对摄影机运动的解算和环境特征的再现两个部分。解算出摄影机的运动，可以使CG元素与画面的运动相匹配；而重建3D环境特征则有助于将CG元素放置到场景中合适的位置。静帧的透视匹配，使用独立的运动匹配软件对运动的镜头进行解算都属于此类。

为了更好的解释运动匹配的内容，我先引入一个代表性的例子。如图1.2.1所示，这是电视剧《大工匠》中的一个视效镜头。导演需要一个冬日大雪的场景，但是因为拍摄时间的限制，不可能无限期地等待下雪的日子，人工造雪也有难度，因此决定用电脑特效来制作这个下雪的环境。



图1.2.1 等待添加雪景特效的电视剧镜头

在拍摄那天，导演根据剧情需要，决定如何拍摄这个镜头，当然也包括摄影机的位置和运动方式。导演和摄影师会先操作摄影机运动几次，并观看视频的回放来察看拍摄的结果。然后当他们正式开拍的时候，两名演员在一个大水泥筒内相依而睡，水泥筒被吊车吊起，摄影机的焦点跟随水泥筒而动。一旦导演对拍摄的镜头满意了，摄影机拍摄的素材会被采集出来，然后交给视效

公司来添加环境中的雪景。

当视效公司接到数字化的镜头素材，他们开始讨论这个场景需要添加哪些CG元素。讨论的结果是将其分为三部分：一个动画师来制作水泥筒两端的三维积雪，一名技术导演来做天空满天飞舞的飘雪特效，最后一名合成师来制作整个场景遍布的雪霜。当然，他们也需要一个运动匹配师来对这个镜头进行运动匹配。

视效艺术家的目标是使他们的3D元素像摄影机记录的场景一样真实。动画师需要让三维积雪的形态与水泥筒的外形完美匹配，技术导演需要让天空的飞雪像真的一样。运动匹配师需要解算出场景被摄影机记录下来时，摄影机的位置在哪儿，以及它是如何运动的。

这里运动匹配师扮演了一个重要的角色，因为要使积雪、飞雪跟场景真实地匹配起来，他就必须确保CG物体被CG摄影机所“拍摄”的方式跟真实摄影机拍摄场景的方式一致。想象一下，如果水泥筒边缘部分的CG积雪跟水泥筒的运动有丝毫差异，任何人都会知道这是假的。

理想的情况下，特效镜头的拍摄过程中，特效公司会派出视效总监参与布景，并测量场景中关键的参数。例如摄影机的镜头焦距、离地高度、摄影机与水泥筒的距离、水泥筒的直径等，并绘制一张粗略的布景图，记录下可能会用到的道具和灯光的位置。

一般而言，动画师、技术导演和运动匹配师是同时开始工作的。因为拍摄时已经测量过一些数据，动画师知道水泥筒的直径，可以配合画面开始水泥筒和积雪的建模和材质调试工作，技术导演知道整个场景的大小，可以测试飘雪的粒子特效。这些前期的工作彼此之间相对孤立，使得一个团队可以有效地利用时间和人员。

在这期间，运动匹配师首先要检视素材，思考这段镜头里摄影机是如何运动的。他会将素材导入运动匹配软件，并开始跟踪场景中的2D特征点，看那些点如何在屏幕上运动。2D跟踪通常需要场景中包含可识别的静止的物体（例如建筑物的边角，规则的图案等），然后随着镜头画面的更替，软件会自动跟踪这些特征。

一旦运动匹配师跟踪完一些2D特征点，软件会对这些跟踪点进行分析，然后计算出摄影机与场景中其他元素的相对位置。最后，运动匹配师会输出一个场景到三维软件中，这个场景将包含一个动画的摄影机以及被他跟踪出来的所有特征点的3D位置。

经过必要的测试后，如果运动匹配师对跟踪的结果感到满意，他会将动画师制作的水泥筒和积雪的模型导入这个包含摄影机动画的场景，并依据跟踪出来的特征点合理地放置水泥筒模型的位置。如果所有的工作都得以完美进行的话，播放动画，在摄影机视图里，他将看到CG积雪以正确的透视和比例跟随画面中的水泥筒一起运动。

最后，他需要保存这个匹配好摄影机的场景。动画师和技术导演将调用这个场景来完成自己更细致的工作。动画师会在匹配好的积雪上进行更深入的雕塑，技术导演会依据摄影机和水泥筒的位置控制自己的粒子运动。最后他们会使用这个摄影机来渲染动画（如图1.2.2所示）。合成师会将所有这些元素结合在一起，经过调色加工得到最后的成片。

需要说明的是，在分工极度细化的好莱坞，设有运动匹配师（Matchmover）一职来专门负责3D运动匹配，并将匹配好的场景提交给生产流程上的其他人。国内的影视公司目前分工没有那

么细，一般由接手镜头的三维动画师直接完成该镜头的运动匹配。但是为了方便叙述，本书中依然使用“运动匹配师”来代表完成运动匹配的人。

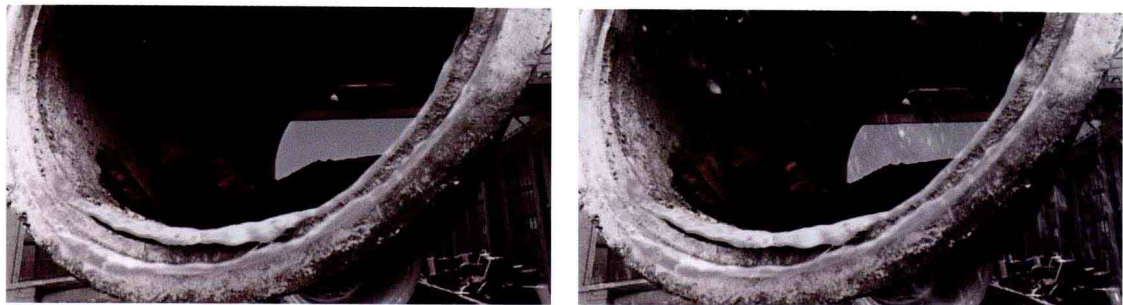


图1.2.2 完成运动匹配并渲染出来的积雪和飘雪的画面。当镜头播放的时候，CG的积雪、飘雪的透视和运动关系应该与拍摄的原始素材一致

1.3 运动匹配的工作体系

在介绍运动匹配工作的流程之前，我想先简单讨论一下现实中的摄影机是如何工作的，因为摄影机是三维世界和二维图像的桥梁，它也是运动匹配工作的核心。现实中，当摄影机开拍之后，它基本上就只做一件事：捕捉三维世界的视觉信息并记录到二维的图像上。不妨想象一下那一瞬间究竟发生了什么。

来自场景的光线通过摄影机镜头被聚焦到胶片上，胶片曝光记录下光照信息，然后快门关闭，曝光后的胶片被更换、重置，然后快门再次打开，整个过程重复进行。对数码摄影机而言，胶片被CCD (Charge-Coupled Device)所替代，它电子化地捕捉光线信息，然后以数字形式存储到各种存储设备中。

3D动画程序中的摄影机都是基于真实摄影机的，它是真实摄影机在光学和结构方面完美的数字化模型。跟真实的摄影机一样，它们有焦距和压片背 (film back——胶片摄影机中用于限制胶片上感光范围的装置)。但是它们只是简单地获取它们所在的、人造的、计算机生成的环境信息，而不是获取真实世界的光线。

无论你是否处理曝光的胶片或是进行3D渲染，最终的图像都是一个投影。这就是说，三维的场景被变平为此场景的二维表现中。我们是如此习惯于这些变平的图像，以至于我们很难注意到它们，但是每次我们看电视或电影的时候，我们实际上都是在观看一个三维场景的平面记录（如图1.3.1所示）。

如果说摄影机的作用是采集三维的世界，制作二维的图像，那么一名运动匹配师的工作则恰恰相反。运动匹配师必须采集一系列二维的图像，并创建一个三维的世界。这两者之间的桥梁就是摄影机。如果关于摄影机的信息能被重建，那么就有可能指出在拍摄时的3D环境是怎样的。这

些有关3D环境和摄影机的信息就是运动匹配师最终要提交给动画师进行工作的东西。

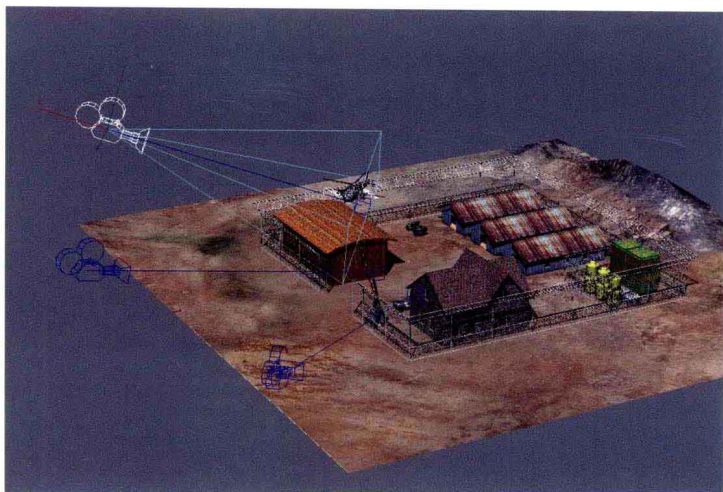


图1.3.1 当一个摄影机捕捉到一张三维世界的图像，它实际上捕捉的是来自这个场景而被投影到摄影机图像平面的光线

尽管有很多不同的方法来完成任务，但对每个镜头而言，一名运动匹配师的工作流程几乎都是相同的（如图1.3.2所示）。这张图展示了一个完整的运动匹配工作体系。

一般来说，运动匹配工作是从分析素材开始的。这是整个流程中最重要的一步，虽然并不会花费多少时间，但分析的结果会直接影响你采用何种工具来完成这项工作。对镜头进行仔细的观察能帮你做出正确的决定，避免意想不到的问题，并估计花费的时间。尤其最后一项，考虑到运动匹配工作对整个生产线的影响，控制合理的耗费时间对于保证整个项目的进度有重要意义。

对素材的分析过程并没有很明确的约束步骤，因为确定运动匹配的难度涉及多方面的因素，往往只能依靠经验来判断。虽然经验并不总是正确的，但有些共性的问题是需要被考虑的，这包括：

- 摄影机是否运动了？如果是，那么它是如何运动的？运动得有多快？时长多少？
- 素材是什么格式？是电影镜头、高清、标清？画面是否被压缩？颗粒和噪点的程度怎样？
- 需要在镜头中放置什么元素？对匹配的精确性要求如何？
- 使用运动匹配结果的是谁？他们将如何使用？

当然，这些仅仅是一些皮毛，但是你考虑的问题越多，你就越清楚自己需要做什么。当你对接手的镜头做出了大致的评估之后，接下来需要汇总所收集到的数据，为接下来的解算摄影机做准备。