基于线特征的交通事故现场数字化重构 *

韩学源[a,b]，金先龙[a,b]，张晓云[a,b]，苗新强[a,b]
（上海交通大学 a. 机械系统与振动国家重点实验室；b. 机械与动力工程学院，上海 200240）

摘　要：为适应交通事故现场快速勘测的要求，将计算机图像处理和近景摄影测量技术应用于交通事故现场勘测中。结合事故现场图片中的坐标轴平行线特征，建立像素坐标与物方空间坐标之间的对应关系，实现交通事故现场的二维数字化重构。最后，结合实验和真实交通事故案例验证了该方法的有效性。实践证明，将计算机数字图像处理和近景摄影测量技术应用于交通事故现场勘测，可以明显提高其快捷性和方便性。

关键词：直线特征；数字图像处理；摄影测量；交通事故重构；直接线性变换
中图分类号：TP39　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-3695(2012)03-1195-03
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.03.110

Numerical reconstruction of traffic accident based on linear features

HAN Xue-yuan[a,b], JIN Xian-long[a,b], ZHANG Xiao-yun[a,b], MIAO Xin-qiang[a,b]
(*a. State Key Laboratory of Mechanical System & Vibration, b. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai* 200240, *China*)

Abstract: In order to meet the requirements of fast mapping of the traffic accident scene, this paper adopted computer image processing and close-range photogrammetry theory. By the information of lines that parallel the coordinate axis in the accident scene, the relationship between objects' pixel coordinate and real-world coordinate could be established, so the traffic accident's 2D model could be created as well. Then, it took an experiment and a real traffic accident as examples to show its efficiency. It is proved that the use of computer image processing and close-range photogrammetry theory can improve the convenience of traffic accident information acquisition.

Key words: linear features; digital image processing; photogrammetry; traffic accident reconstruction; direct linear transformation

0　引言

随着汽车保有量的增加和车速的提高，交通事故近年来也逐渐呈上升趋势。传统的事故现场勘测方法采用现场拉皮尺、手工草绘的方法进行操作，不仅效率低下、容易错画和漏画，而且容易造成交通堵塞。近年来，近景摄影测量、计算机视觉和数字图像处理技术开始应用于交通事故现场勘测中，大大提高了现场勘测的效率和精确度。本文基于近景摄影测量中的直接线性变换法，结合事故现场中的坐标轴平行线等相关特征信息，通过求得像空间坐标与物方空间坐标的透视变换关系，构建了事故现场的数字化二维模型，为交通事故的现场勘测提供了一种新方法。

近景摄影测量中的影像可由量测相机或者非量测相机所得。若采用量测相机摄取影像，可用航空摄影测量的解析法来处理，如共面条件方程法、空间后方—前方交会解法、光束法等；若采用非量测相机摄取影像，因为非量测相机物镜畸变差较大、无定向装置、内方位元素不稳定、外方位元素未知，所以不能用航空摄影测量的解析法来处理影像，但可以使用直接线性变换解法（direct linear transformation）。直接线性变换解法是建立像点坐标和相应物点物方空间坐标之间直接的线性关系的算法，特别适用于非测量相机，如普通相机、高速摄影机、CCD 摄像机等。

1　数学模型

1.1　二维直接线性变换解法

照片上的像点数字阵列坐标(u,v)与对应物点的物方空间二维坐标(X,Y)有以下关系式：

$$\begin{cases} u+\dfrac{l_{11}X+l_{12}Y+l_{13}}{l_{31}X+l_{32}Y+1}=0 \\ v+\dfrac{l_{21}X+l_{22}Y+l_{23}}{l_{31}X+l_{32}Y+1}=0 \end{cases} \tag{1}$$

其中：直接线性变换矩阵为 l。

$$l=\begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & l_{13} \\ l_{21} & l_{22} & l_{23} \\ l_{31} & l_{32} & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

当控制点大于 4 个时，式(1)所构成的线性方程矩阵如下：

收稿日期：2011-07-19；**修回日期**：2011-08-23　　**基金项目**：国家自然科学基金资助项目(50875166)；上海市科委重点攻关资助项目(09231203100)

作者简介：韩学源(1985-)，男，河南南阳人，硕士，主要研究方向为交通事故现场测量、工程 CAD/CAE 分析等；金先龙(1961-)，男，教授，博导，主要研究方向为 CAD/CAE 技术及应用、计算机仿真、高性能计算、网络计算技术及应用等(jxlong@sjtu.edu.cn)；张晓云(1975-)，男，副教授，主要研究方向为交通安全数字化技术、工程 CAE 分析；苗新强(1983-)，男，博士，主要研究方向为交通事故现场测量、工程 CAD/CAE 分析等.

$$\begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & u_1X_1 & u_1Y_1 \\ 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & 1 & v_1X_1 & v_1Y_1 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ X_n & Y_n & 1 & 0 & 0 & 0 & u_nX_n & u_nY_n \\ 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & 1 & v_nX_n & v_nY_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_{11} \\ l_{12} \\ l_{13} \\ l_{21} \\ l_{22} \\ l_{23} \\ l_{31} \\ l_{32} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \cdots \\ u_n \\ v_n \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

式(3)建立了空间二维平面与像平面的直接线性变换关系,无须内方位元素。在无框标的情况下,如果已知四个及以上的平面控制点,通过计算机编程求解 DLT 矩阵,即可进行平面之间的透视变换。

1.2　传统求解方法

根据式(3)可知,当在现场空间布置四个及以上的控制点时,由控制点的像点坐标以及所测实际空间坐标根据二维直接线性变换公式建立方程组求解得到二维直接线性变换的系数矩阵 l,建立像素坐标与空间坐标的对应关系,进而可对事故现场进行重建。该方法需要在现场布置四个及以上控制点,并需记录相应控制点的物方空间坐标数据。

1.3　坐标轴平行线与控制点综合求解法

由图像点(u,v)和对应的实际空间点(X,Y)之间的关系式(1)可知,如果在物方空间有某直线平行于物方空间的坐标轴 Y,此直线上的两点(X_1,Y_1)、(X_2,Y_2)与对应于图片上像点(u_1,v_1)、(u_1,v_2),必然有 $X_1=X_2$,将式(1)代入可得

$$\frac{u_1-u_2}{v_1-v_2}=\frac{\dfrac{l_{11}X_1+l_{12}Y_1+l_{13}}{l_{31}X_1+l_{32}Y_1+1}-\dfrac{l_{11}X_2+l_{12}Y_2+l_{13}}{l_{31}X_2+l_{32}Y_2+1}}{\dfrac{l_{21}X_1+l_{22}Y_1+l_{23}}{l_{31}X_1+l_{32}Y_1+1}-\dfrac{l_{21}X_2+l_{22}Y_2+l_{23}}{l_{31}X_2+l_{32}Y_2+1}} \quad (4)$$

式(4)可写为如下行列式:

$$\frac{u_1-u_2}{v_1-v_2}=\frac{\begin{vmatrix} l_{11}X_1+l_{12}Y_1+l_{13} & l_{11}X_2+l_{12}Y_2+l_{13} \\ l_{31}X_1+l_{32}Y_1+1 & l_{31}X_2+l_{32}Y_2+1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} l_{21}X_1+l_{22}Y_1+l_{23} & l_{21}X_2+l_{22}Y_2+l_{23} \\ l_{31}X_1+l_{32}Y_1+1 & l_{31}X_2+l_{32}Y_2+1 \end{vmatrix}} \quad (5)$$

将式(5)第二列乘以 -1 加到第一列上,因 $X_1=X_2$,得

$$\frac{u_1-u_2}{v_1-v_2}=\frac{\begin{vmatrix} l_{12}(Y_1-Y_2) & l_{11}X_2+l_{12}Y_2+l_{13} \\ l_{32}(Y_1-Y_2) & l_{31}X_2+l_{32}Y_2+1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} l_{22}(Y_1-Y_2) & l_{21}X_2+l_{22}Y_2+l_{23} \\ l_{32}(Y_1-Y_2) & l_{31}X_2+l_{32}Y_2+1 \end{vmatrix}}=\frac{\begin{vmatrix} l_{12} & l_{11}X_2+l_{12}Y_2+l_{13} \\ l_{32} & l_{31}X_2+l_{32}Y_2+1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} l_{22} & l_{21}X_2+l_{22}Y_2+l_{23} \\ l_{32} & l_{31}X_2+l_{32}Y_2+1 \end{vmatrix}} \quad (6)$$

式(6)分子分母同除以$(l_{31}X_2+l_{33}Y_2+1)$,得

$$\frac{u_1-u_2}{v_1-v_2}=\frac{\begin{vmatrix} l_{12} & u_2 \\ l_{32} & 1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} l_{22} & v_2 \\ l_{32} & 1 \end{vmatrix}} \quad (7)$$

式(7)可写做如下形式:

$$(v_1-v_2)l_{12}+(u_2-u_1)l_{22}+(u_1v_2-u_2v_1)l_{32}=0 \quad (8)$$

同理,当已知线段垂直于 Y 轴时,同样方法可得

$$(v_1-v_2)l_{11}+(u_2-u_1)l_{21}+(u_1v_2-u_2v_1)l_{31}=0 \quad (9)$$

式(8)(9)为齐次线性方程,为了在计算机中编程求解,可将式(8)的左右两边同除以 l_{22},将式(9)的左右两边同除以 l_{11},变化为非齐次线性方程组,写做如下形式:

$$(v_1-v_2)\frac{l_{12}}{l_{22}}+(u_1v_2-u_2v_1)\frac{l_{32}}{l_{22}}=u_1-u_2 \quad (10)$$

$$(u_2-u_1)\frac{l_{21}}{l_{11}}+(u_1v_2-u_2v_1)\frac{l_{31}}{l_{11}}=v_2-v_1 \quad (11)$$

由式(10)可知,当至少有两条垂直于 X 轴的直线时,可通过对非齐次线性方程的求解,得到 l_{12}/l_{22}、l_{32}/l_{22} 的值。同理,由式(11),当至少有两条平行于 Y 轴的平行线时,得到 l_{21}/l_{11}、l_{31}/l_{11} 的值。令 $l_{12}/l_{22}=q_1$,$l_{32}/l_{22}=q_2$,$l_{21}/l_{11}=p_1$,$l_{31}/l_{11}=p_2$,可知如果已求得 l_{11}、l_{22} 的值,则 l_{12}、l_{32}、l_{21}、l_{31} 的值也就随之确定,此时直接线性变换矩阵的待定未知数只有 l_{11}、l_{22}、l_{13}、l_{23},可将 $l_{12}/l_{22}=q_1$,$l_{32}/l_{22}=q_2$,$l_{21}/l_{11}=p_1$,$l_{31}/l_{11}=p_2$ 代入式(1),通过移项、合并,建立如下方程:

$$\begin{cases} u=(X-Xup_2)l_{11}+l_{13}+(Yq_1-Yuq_2)l_{22} \\ v=(Xp_1-Xvp_2)l_{11}+l_{23}+(Y-Yvq_2)l_{22} \end{cases} \quad (12)$$

式(12)即为待求未知数的方程,如果确定不少于两个不在同一坐标轴上的控制点,即可求解透视转换矩阵的所有解。式(12)可写为如下矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} X_1-X_1u_1p_2 & 1 & Y_1q_1-Y_1u_1q_2 & 0 \\ X_2-X_2u_2p_2 & 1 & Y_2q_1-Y_2u_2q_2 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ X_n-X_nu_np_2 & 1 & Y_nq_1-Y_nu_nq_2 & 0 \\ X_1p_1-X_1v_1p_2 & 0 & Y_1-Y_1v_1q_2 & 1 \\ X_2p_1-X_2v_2p_2 & 0 & Y_2-Y_2v_2q_2 & 1 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ X_np_1-X_nv_np_2 & 0 & Y_n-Y_nv_nq_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_{11} \\ l_{13} \\ l_{22} \\ l_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \cdots \\ u_n \\ v_1 \\ v_2 \\ \cdots \\ v_n \end{bmatrix} \quad (13)$$

式(13)即可用求解齐次线性方程组的方法在计算机中编程进行求解,得到 l_{11}、l_{13}、l_{22}、l_{23} 的值,进而可得到 l_{12}、l_{32}、l_{21}、l_{31} 的值,从而确定了直接线性变换矩阵的所有解。

由于图像上点的像素坐标可由计算机图像处理技术获得,因此,根据以上推导分析可知,如果在图像中提取两条平行于 X 轴,两条平行于 Y 轴的直线端点像素坐标信息,仅需测得两个控制点的空间坐标数据,即可在计算机中编程求得直接线性变换矩阵的所有解。相比较地,由于控制点求解法需要测得四个以上的控制点空间坐标;而本文所述方法可以将控制点减少到两个,并且可以充分利用现场照片的某些特征信息,如人行道斑马线、道路边缘的平行线等,这样可以提高事故现场勘测的方便性和实用性。

2　摄影测量实验

2.1　实例 1

为了验证所述方法的可行性和有效性,特做如下实验:实验 1 采用所制作的大号棋盘标定物(每个棋盘单元格长宽皆为45 cm),在实验中仅布置两个控制点 C_1、C_2,其坐标(单位为 m)分别为 $C_1(0,0)$、$C_2(1.80,3.60)$,同时绘制两条平行于 X 轴的线段 X_1、X_2,两条平行于 Y 轴的线段 Y_1、Y_2,如图 1 所示。

为了检测该方法的精度,在实验中布置了四个角标 T_1、T_2、T_3、T_4,如图 2 所示。

本文采用上述方法所开发的软件,通过获取的坐标信息,可解得直接线性变换矩阵值,并能对图像进行正投影变换从而重构实验现场的二维 CAD 模型。二维模型重构如图 3 所示。

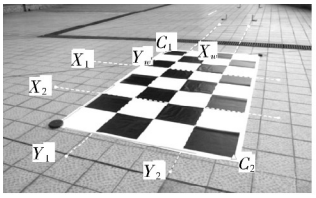

图 1　控制点和轴平行线的实验布置

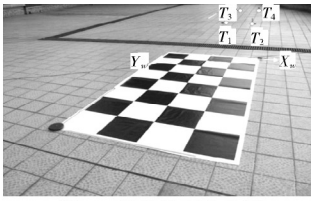

图 2　角标的实验布置

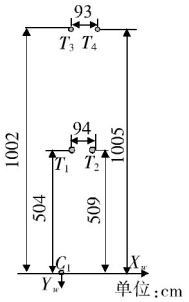

图 3　实验现场的二维重建

四个角标 T_1、T_2、T_3、T_4 的现场放置实际距离与投影测绘所得距离以及误差分析如表 1 所示。

表 1　实例 1 测绘结果比较

角标	实际距离/m	测绘距离/m	相对误差/%
T_1-X	5.00	5.04	0.8
T_2-X	5.00	5.09	1.8
T_3-X	10.00	10.02	0.2
T_4-X	10.00	10.05	0.5
T_1-T_2	0.92	0.94	2.2
T_3-T_4	0.92	0.93	1.1

对实验分析可知,只需两个已知点的二维坐标数据,结合实际空间中与坐标轴相平行的线性特征信息,即可求解像空间坐标与物方空间坐标的透视变换关系,充分利用了相片中具有某些几何特征的已知信息,提高了图像透视转换的便捷性。

2.2　实例 2

2011 年某日发生交通事故,乙车与甲车发生追尾事故,碰撞后两车的位置如图 4 所示。本案例在现场采用所制作的小号棋盘标定物(每个棋盘单元格长宽皆为 25 cm),为了对现场进行二维重构,本例采取轴平行线与控制点综合求解法,在实验中仅布置两个控制点 C_1、C_2,其坐标(单位为 m)分别为 C_1(0,0)、C_2(−1.00,2.00),同时绘制两条平行于 X 轴的线段 X_1、X_2,两条平行于 Y 轴的线段 Y_1、Y_2。

所获取信息如表 2 所示。

表 2　案例 2 控制点及轴平行线

线段	控制点及坐标/m
	点 C_1(0,0)、点 C_2(−1.00,2.00)
平行于 X 轴的线段	X_1、X_2
平行于 Y 轴的线段	Y_1、Y_2

通过计算机图像处理技术读取线段端点在相片上的坐标,采取本文所述坐标轴平行线与控制点综合求解法,即可解得直接线性变换矩阵 l,进而可求得相关几何位置以及尺寸信息等。两车前、后轮与道路边缘的测绘距离分别与事故报告中所量测的实际距离比较,结果如表 3 所示。

表 3　案例测绘结果比较

比较点	实际距离/m	测绘距离/m	相对误差/%
甲车前轮—道路边缘	1.95	1.96	0.51
甲车后轮—道路边缘	2.12	2.09	1.42
乙车前轮—道路边缘	2.67	2.66	0.37
乙车后轮—道路边缘	2.52	2.53	0.40
甲车后轮—乙车前轮	3.12	3.17	1.60

通过矩阵 l 可对事故现场的车辆位置、制动痕迹等进行二维 CAD 重构,如图 5 所示。

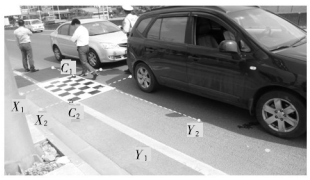

图 4　实例 2 事故现场

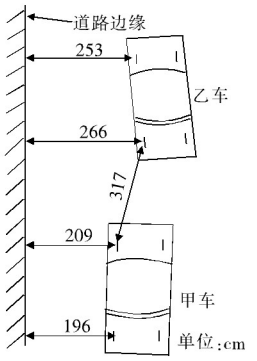

图 5　实例 2 事故现场重构

通过对该实例分析可知,运用计算机图像处理技术与摄影测量理论,结合现场相片中的轴平行线特征,在保证测量精度的同时,可以在事故图片上根据实际要求,测绘所需要的距离尺寸及相关信息,从而大大减少了在现场的测绘工作量,提高了道路交通事故现场测绘效率。

3　结束语

本文根据事故现场中的坐标轴平行线等相关特征信息,结合计算机图像处理技术与摄影测量理论,对传统求解方法,即控制点求解法进行扩展,提出了具有轴平行线特征的直线与控制点综合求解法。该方法可充分利用现场相片中的平行线特征信息,为交通事故现场勘测提供一种新的解决思路,尤其是对于具有较多线性平行特征标志的事故现场更加实用、更加方便。

参考文献:

[1]　杨博,金先龙,张晓云,等.基于数字化摄影测量交通事故信息采集和过程再现[J].汽车工程,2010,32(6):530-534.

[2]　LAZAROS G, GEORGE K, ELLI P. An automatic approach for camera calibration from vanishing points[J]. Photogrammetry & Remote Sensing,2007,62(1):64-67.

[3]　郭海涛,张龙星,申家双,等.一种基于直线特征的影像外方位元素解算理论与方法[J].测绘科学技术学报,2011,28(1):42-45.

[4]　杜新光,金先龙,张晓云,等.基于摄影测量技术的交通事故再现几何特征提取[J].上海交通大学学报,2008,42(6):861-864.

[5]　REMONDINO F,FRASER C. Digital camera calibration methods:considerations and comparisons[J]. International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2006,36(5):265-272.

[6]　FENTON S,JOHNSON W,LAROCQUE J,*et al*. Using digital photogrammetry to determine vehicle crush and equivalent barrier speed [J]. Engineering,1999(724):295-310.

[7]　张慧鑫,李非栗,雷巨光.基于普通数码相机的近景摄影测量方法与精度的试验研究[J].北京测绘,2008(4):4-7.

[8]　金先龙,张晓云.交通事故数字化重构[M].北京:人民交通出版社,2007.

[9]　SHASHI M, JAIN K. Use of photogrammetry in 3D modeling and visualization of buildings [J]. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences,2007,2(2):37-40.

[10]　冯文灏.近景摄影测量[M].武汉:武汉大学出版社,2002.

[11]　杨长根,易思蓉,秦方方.数字摄影测量系统在道路选线中的应用研究[J].路基工程,2011(1):138-143.