

Research on the Automatic Assembly Control System of the Cement Block of the Robotic Manipulator on the New Road Paver

Leqiang He, Yanwen Yu, Jinzhu Tian

Shanghai Zhenhua Heavy Industries Co., Ltd., Shanghai
Email: yuyanwen@zpmc.com

Received: Feb. 25th, 2020; accepted: Mar. 13th, 2020; published: Mar. 20th, 2020

Abstract

In view of the laying of temporary construction roads in the construction process of Xiong'an New District, a cement precast slab paving equipment vehicle with high degree of automation has been specially developed. This paper introduces the automatic assembling system of cement blocks on the new paver. Combined with the mutual work of two folding arm cranes, through the machine vision positioning system, the precise assembly of precast slab is carried out to realize the automatic operation in the process of assembly road laying, which greatly improves the road construction progress.

Keywords

Road Paver, Robotic Manipulator, Visual Positioning, Intelligence, Automatic

新型铺路机上双折臂吊水泥预制板自动拼装控制系统研究

何乐强, 俞燕雯, 田金柱

上海振华重工(集团)股份有限公司, 上海
Email: yuyanwen@zpmc.com

收稿日期: 2020年2月25日; 录用日期: 2020年3月13日; 发布日期: 2020年3月20日

摘要

针对雄安新区建设过程中的临时施工道路的敷设, 特意开发了一款自动化程度较高的水泥预制板铺路设

备车。本文介绍了新型铺路机上面的水泥块自动拼装系统。结合两座折臂起重机的互相工作，通过机器视觉定位系统，对预制板进行了精确的拼装，实现装配式道路敷设过程中的自动化运行，极大地提高了道路施工进度。

关键词

铺路机，折臂吊，视觉定位，智能，自动化

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

雄安新区作为我国近年来最大的新区规划，其所展现出来的所有建筑都带有我国向世界展现未来城市应有的样子。其中也包括了在建设过程中产生的大量临时施工道路。

为响应雄安“建成绿色城市、森林城市、海绵城市、智慧城市”的号召[1]，确保工程建设每一工序的环保节能，适应中国新时期建设特色，急需研发出一套体现以上精神的道路施工方案。目前国内工程项目施工现场的临时施工道路多采用现浇混凝土路面结构，但其养护时间长，且破除后会造成人工和材料的浪费，产生大量建筑垃圾，对环境造成危害。

中交建在道路建设中进行了预制装配式临时道路的研发，为了实现绿色环保、流程化快速建设、造价适宜等目的特意研发了一整套的敷设方法方案。如图1所示就是此种拼装道路的路面展示：

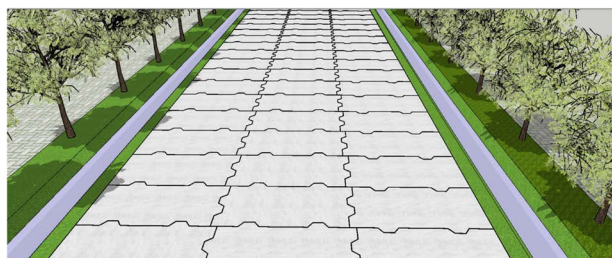


Figure 1. Assembly road by precast block

图 1. 装配式道路示意图

针对这种道路特点我公司研发了一种自动化程度较高的专用水泥预制板铺路设备车。此文介绍了铺路设备车(铺路机)的水泥块自动拼装系统。

2. 新型铺路机介绍

铺路机上主要设备为两个折臂吊机和一套平移功能。如图2所示。

新型铺路机通过双折臂吊从运输平板车上吊取水泥预制板，并在铺路机的工作平板上进行拼装，然后往前输送，顺利铺设在已整平路基上，从而达到快速铺设水泥路面的功能。两个折臂吊会根据路面宽度要求，切换拼装顺序及方法，可以适应4~12米的路面，基本覆盖临时施工道路的需求。本机控制系统的核心就是两个折臂吊的交叉作业，防碰撞系统，自动定位功能及识别预制板的图像识别系统。难点在于视觉识别系统与变频系统的完美结合，才能保证毫米级的拼装精度。

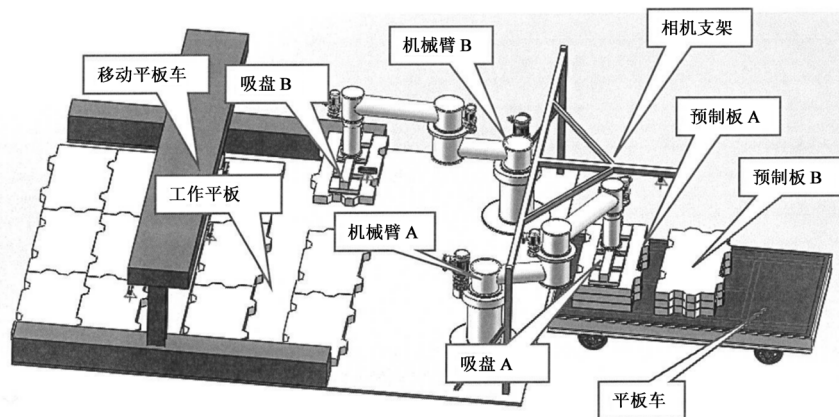


Figure 2. New paver overall
图 2. 新型铺路机总体

2.1. 折臂吊的设计

市面上常见的这种机械臂设计的机器基本都是依托伺服系统进行精确位置控制，类似生产线上的机器人系统，可以用成熟的机器人方案移植到本系统上。但是这种设计要求构件精度极高，尤其是关节处的回转啮合机构，且负载能力较弱，不能适应这种回转半径大，负载达到 10 吨级的工作要求。

为了能够实现现场工况要求，此次机械臂被设计成常用的平面二连杆方案，且驱动系统采用常规的变频器带鼠笼式三相电机的方案。本方案具有设计简单，加工简单，驱动能力强，环境适应能力强等优点，缺点是齿轮间间隙大，电机只能进行速度控制，回转角度依托另装的绝对值编码器进行检测，控制精度不高。

折臂吊是本设备的核心组件，也是本机的执行机构。折臂吊的具体结构见图 3。

如图 3 所示，折臂吊主体是一个水平二连杆机械臂设计，臂上安装有三个电机，各自驱动主臂，副臂和真空吸吊机进行回转。

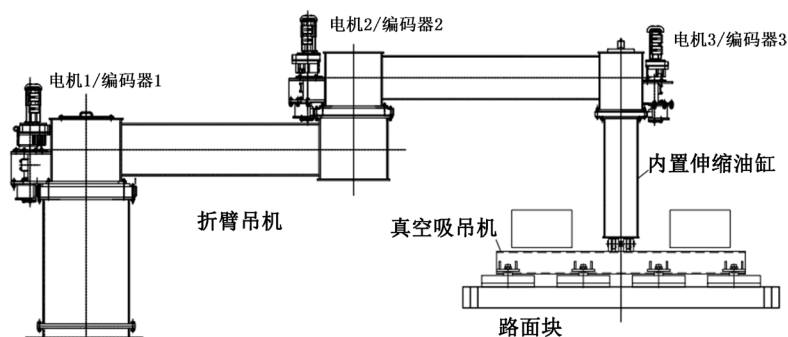


Figure 3. Two-link manipulator crane
图 3. 折臂吊示意图

在臂架前端和真空吸盘之间有一个伸缩油缸，负责吸盘的上下调整。可以在一定范围内下把真空吸盘降到预制板位置进行吸取、释放操作。在油缸末端安装有一个带有四个独立吸盘的真空吸吊机。可以快速对预制板进行吸取、释放操作。这种方式可以快速抓取预制板，优点是预制板上不再需要更外布置吊点，便于预制板的制作。铺好的路面也更平滑，适合车辆行走。

在每个回转机构的关节处另外还各布置了一个绝对值编码器，用于记录当前的回转角度，角度精度为 0.02° 。

2.2. 视觉定位系统介绍

这种大型的机械臂的轨迹跟踪误差主要来自于由齿轮减速器、皮带和轴等关节传动部分引起的各轴的非线性特性，关节中最常见的非线性效应与刚度、摩擦和传动误差有关[2]，再加上测量角度的绝对值编码器与关节轴之间也有误差，所以机械结构及驱动方式决定了铺路机必须依靠外物来实现准确定位。作为一个高度自动化工作的智能铺路装置，对于目标物的自动识别与检测就是很关键的一个步骤，而视觉定位系统就起到了这个作用。根据反馈信息类型的差别，机器人视觉伺服一般分为基于位置的视觉伺服控制、基于图像的视觉伺服控制混合视觉伺服控制3类[3]。本系统采用了简单的基于图像的视觉伺服控制。

视觉定位系统是通过计算机模拟人的视觉功能，实现实际的检测和控制。视觉定位系统效果的好坏与图像质量高低成正比，大多数情况下，视觉定位系统处理效果差，多是图像质量低、特征信息模糊导致的。为了采集到高质量、特征信息明显的可处理图像，需要亮度、对比度以及鲁棒性都较好的光源[4]。

视觉定位系统工作流程依次为初始化，曝光参数调整，去噪声滤波、自适应二值化，有效像素提取，标志线提取，偏移距离计算，判断结果有效性，数据输出。

本套系统有5套定位装置组成，具体布置如下图4：

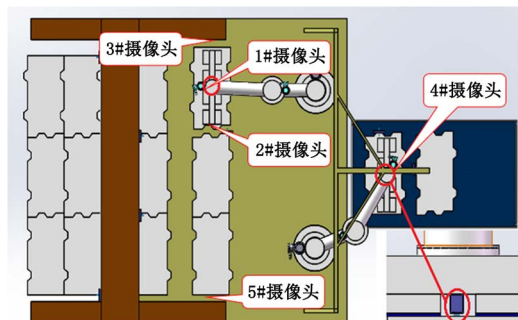


Figure 4. Layout of visual locating camera
图4. 视觉定位摄像头布置示意图

其中1#摄像头，4#摄像头各安装于两个吊具吸盘中心位置，用于预制板抓取点精确定位。2#摄像头在1#吸盘左侧，用于中间预制板在平台上的放置定位。3#摄像头，5#摄像头用于平台两侧与预制板之前间隙的精确定位。

首先由于预制板尺寸太大，因视觉设备安装位置受限，致使视觉设备视野狭小。为了实现预制板精确定位，我们在预制板的几何中心增加了标志点。同时，避免因环境等外部因素引入的噪声，提高定位的精度和稳定性。如图5中所示的预制板中的标记点。

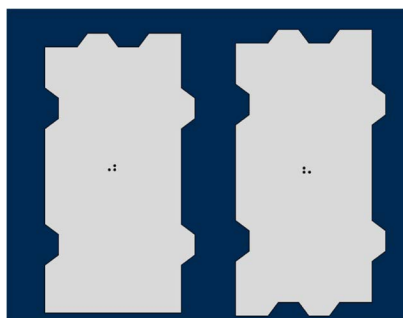


Figure 5. The marker on precast block
图5. 不同预制板对应的标记点

标记由三个圆组成，定义坐标 XOY。如图 6 所示：

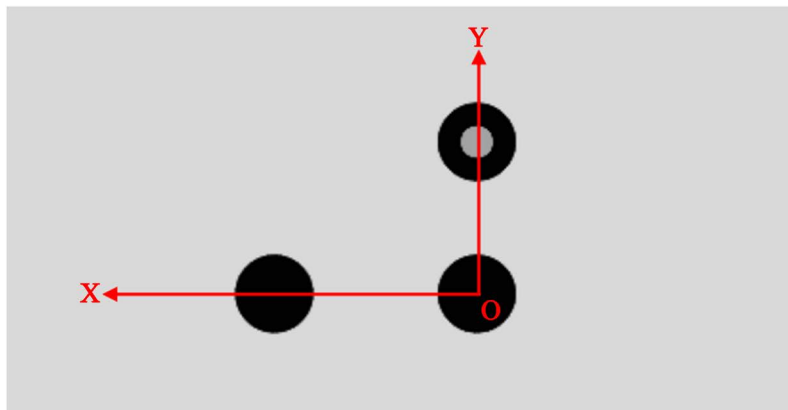


Figure 6. Coordinate system of marker on block
图 6. 标记点坐标系

而机械臂本身由于多条臂的存在会有多个坐标系，如图 7 所示：

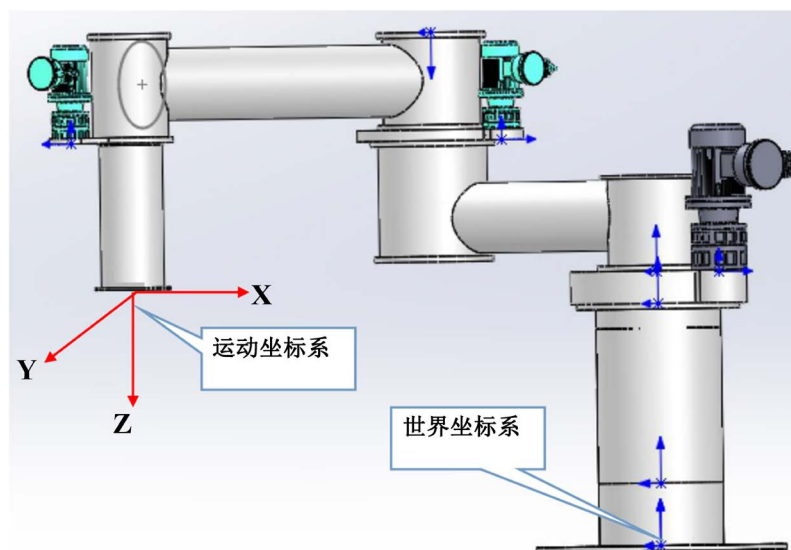


Figure 7. Layout of different coordinate systems
图 7. 两坐标系示意图

原始坐标计算以第一轴原点为世界坐标系，末节关节为运动坐标系(即真空吸盘中心点)像头坐标系。定位系统会给吊机控制器 X、Y 轴的偏移量，Z 轴方向的旋转量。视觉计算的位置偏移量，都是基于运动坐标系与标记点坐标系之间的偏移量(与机器人的工具坐标系概念类似)。比如，在 X 方向偏移 2 mm，即以运动坐标系的 X 轴方向，移动 2 mm。

3. 工作原理分析

3.1. 数学建模

机械臂如图 8 所示，图中 θ_1 为关节 1 转角， θ_2 为关节 2 转角， l_1 为主臂的长度， l_2 为副臂的长度。以图中的 O 为原点的 $x_0 - y_0$ 为世界坐标系。 $P(x, y)$ 为副臂末端的坐标。

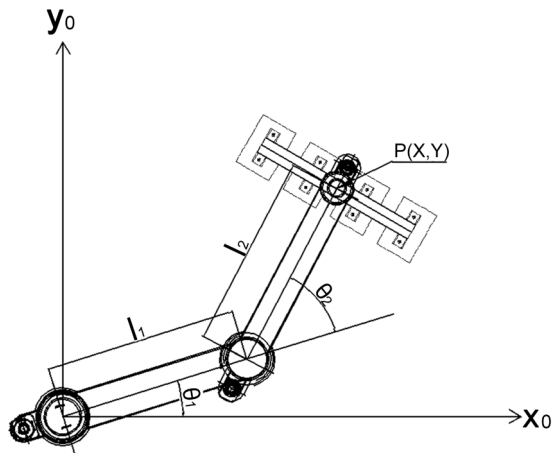


Figure 8. Two-link manipulator model
图 8. 平面双连杆机械臂

末端坐标可以建立以下公式[5]

$$x_p = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (1)$$

$$y_p = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (2)$$

通过对(1)、(2)式的转换,可以得到在当前末端 P 点时 θ_1 、 θ_2 的公式

$$\theta_1 = \arccos\left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) - \arccos\left(\frac{x^2 + y^2}{2l\sqrt{x^2 + y^2}}\right) \quad (3)$$

$$\theta_2 = \pi - \arccos\left[\frac{2l^2 - (x^2 + y^2)}{2l^2}\right] \quad (4)$$

本机的核心功能就是对折臂吊的角度控制,通过电机驱动改变主臂,副臂的角度从而达到目标地点。

3.2. 机械臂的手动操作分析

折臂吊拥有两种操作方式:手动操作和自动操作。

其中手动操作是通过操作平台上的十字操作杆来执行。因为如果对主臂,副臂进行单独控制回转,会极大地增大操作难度,而且还不容易控制机器到达我们需要的目的地。而用十字操作杆的操作方向对应折臂吊真空吸盘在世界坐标系中的运行方向,可以使操作人员不需要对折臂分别控制,从而提高运行速度,降低操作难度。

下面就分析下这种操作模式的原理。

对末端坐标公式(1)、(2)进行微分得到末端速度方程[5]

$$V_x = -l_1 \omega_1 \sin \theta_1 - l_2 (\omega_1 + \omega_2) \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (5)$$

$$V_y = l_1 \omega_1 \cos \theta_1 + l_2 (\omega_1 + \omega_2) \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (6)$$

其中 V_x 为 P 点的 X 轴方向速度, V_y 为 P 点的 y 轴方向速度, ω_1 为主臂的回转角速度, ω_2 为副臂的回转角速度,且 $V_x = \dot{x}_p$, $V_y = \dot{y}_p$, $\omega_1 = \dot{\theta}_1$, $\omega_2 = \dot{\theta}_2$ 。

由于折臂吊的结构组成,需要把机械臂末端的正交方向转化为主副臂的回转速度,才能由驱动机构进行控制。所以需要把(3)、(4)式进行整理,最终可以给出以下方程[6]:

$$\omega_1 = \frac{V_x \cos(\theta_1 + \theta_2) + V_y \sin(\theta_1 + \theta_2)}{l_1 \sin \theta_2} \quad (7)$$

$$\omega_2 = \frac{l_1 V_x \cos \theta_1 + l_2 V_x \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_1 V_y \sin \theta_1 + l_2 V_y \sin(\theta_1 + \theta_2)}{-l_1 l_2 \sin \theta_2} \quad (8)$$

(7)、(8)式是根据末端坐标的 X 轴及 Y 轴的速度分量和主副臂的角度，实时计算主臂与折臂的角速度。接下来需要机械臂在 X 轴方向上进行动作，则把式中 V_y 置零，得到如下两式：

$$\omega_{1x} = \frac{V_x \cos(\theta_1 + \theta_2)}{l_1 \sin \theta_2} \quad (9)$$

$$\omega_{2x} = \frac{l_1 V_x \cos \theta_1 + l_2 V_x \cos(\theta_1 + \theta_2)}{-l_1 l_2 \sin \theta_2} \quad (10)$$

(9)、(10)两式表明通过对操作手柄 X 轴方向的速度给定，可以同时控制主臂和副臂的回转速度来达到在 X 轴方向的直线运动。

机械臂在 Y 轴方向上进行动作，则把式中 V_x 置零，得到如下两式：

$$\omega_{1y} = \frac{V_y \sin(\theta_1 + \theta_2)}{l_1 \sin \theta_2} \quad (11)$$

$$\omega_{2y} = \frac{l_1 V_y \sin \theta_1 + l_2 V_y \sin(\theta_1 + \theta_2)}{-l_1 l_2 \sin \theta_2} \quad (12)$$

(11)、(12)两式表明通过对操作手柄 Y 轴方向的速度给定，可以同时控制主臂和副臂的回转速度来达到在 Y 轴方向的直线运动。

3.3. 机械臂的自动运行分析

因为对铺路机的铺设速度有要求，靠人工操作来实现快速抓取，放置，拼装是不现实的。所以必须走自动化路线。但因为补给车的不连续性，我们把折臂吊设计为一个周期的自动运行，通过两个折臂吊的交叉运行，完成 3 块水泥预制板的抓取到拼装全过程的自动化，不需要人为进行干涉。每次补给运输车到位后，一键启动自动运行，最大限度的提高了工作效率。

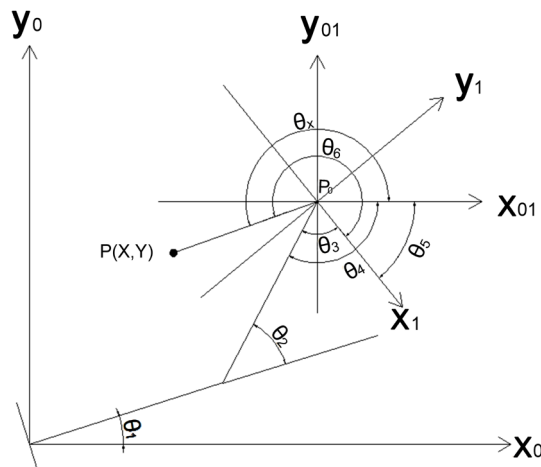


Figure 9. Coordinate transformation

图 9. 坐标切换

要实现自动运行, 因为机械结构及驱动方式决定了必须依靠外物来实现准确定位。视觉定位系统就是这个外物。现在我们假设 $x_0 - y_0$ 坐标系为世界坐标系, $x_{01} - y_{01}$ 坐标系为世界坐标系在 P_0 点的平移坐标系, $x_1 - y_1$ 坐标系为运动坐标系。现在需要把吊机末端从 P_0 移动到 $P(x, y)$ 点。如图 9 所示。

现在我们已知 θ_1 为主臂角度, θ_2 为副臂角度, θ_3 为吸盘相对副臂的回转角度, 视觉定位系统给出运动坐标与目标点 $P(x, y)$ 之间的平面位移 x_{pp_0} 、 y_{pp_0} 及相差角度 θ_6 , P_0 点坐标 (x_0, y_0) 。

第一步: 算出点 $P(x, y)$ 相对于 P_0 的在 $x_{01} - y_{01}$ 坐标系的位移值。

可以简单得出

$$\theta_4 = \pi - (\theta_1 + \theta_2)$$

$$\theta_x = \theta_6 - \theta_5 = \theta_6 - (\theta_4 - \theta_3) = \theta_6 - (\pi - \theta_1 - \theta_2 - \theta_3)$$

相对于 P_0 点的在 $x_{01} - y_{01}$ 坐标系中 P 点 X 轴, Y 轴的位移

$$x_{p01} = \sqrt{x_{pp_0}^2 + y_{pp_0}^2} \cos \theta_x \quad (13)$$

$$y_{p01} = \sqrt{x_{pp_0}^2 + y_{pp_0}^2} \sin \theta_x \quad (14)$$

第二步: 得出目标点 $P(x, y)$ 在世界系中坐标。

$$x_p = x_{p_0} + x_{p01} \quad (15)$$

$$y_p = y_{p_0} + y_{p01} \quad (16)$$

第三步: 把 $P(x, y)$ 点坐标代入上面公式(3)、公式(4)中可以得出目标点 $P(x, y)$ 相对应的主副臂角度, 从而可以命令主臂, 副臂回转到这个角度。在加上视觉定位系统给出的吊具回转角度, 可以移动吊机到定位抓取点。而且视觉定位系统可以实时计算与目标点的数据, 直到吊具到达抓取点。完成对预制板的准确定位, 并实施抓取动作。

抓取完成后, 只要控制折臂吊在固定的路径里移动, 就可以实现点到点回转, 并完成拼装工作。

4. 实机测试总结

当初我们考虑这个抓取预制板的起重臂时有两个主要方向: 一个是采用常规起重臂形式, 一个是采用本文中所述折臂吊形式, 但是综合考虑后采用折臂吊这个方案。主要以下几个方面考虑:

首先折臂吊的转弯半径小, 操作灵活, 效率高, 不占用车厢位置。另外, 折臂吊可以安装各种辅具, 主要安装在吊臂头部, 如真空吸盘、吊篮、机械手等, 使随车起重机具备了一机多用的功能, 所以折臂吊的应用场景更加多样, 进一步扩展了折臂吊的适用性[7]。

其次考虑了供料方式。从图 2 中可以看出折臂吊是在靠近铺路机车尾的、近距离的运料小车上取料, 再近距离地放到铺路机上, 所以所需的幅度要求是不大的; 且运料小车高度是固定的, 其上堆放的路块也是有限的 3 块, 所以取料的高度范围也是不大的; 因此采用双连杆回转臂结构形式和在吊臂头部配置行程有限的提升油缸, 就能达成取料的目的。这种结构形式简单, 有设计和建造经, 可以快速形成设计。

最后从控制角度来说, 也有其优点。这种水平二连杆折臂吊的折臂只要控制 2 个回转电机(2 个转动自由度), 即可在平面内定位。而高度位置, 由另设的升降油缸来完成, 只要简单的三个控制量就可以在转动臂下放的全部空间里实现自由定位。在空间定位的计算上, 坐标系的转换也可以由简单的几何数学完成, 便于控制。

图 10 为施工现场铺路机的抓取水泥块的瞬间。



Figure 10. Paver operating
图 10. 铺路机作业展示

事实证明这次设计的铺路机工作正常，水泥块的抓取和拼装都能快速完成，基本满足设计要求。

但是在作业过程中也发现了问题。在长时间工作后发现油缸开始倾斜，不能垂直下降真空吸盘。这就导致在空中定位好后由于油缸的倾斜，最终吸盘不能精确定位在中心点上，导致抓取后预制板产生了倾斜，造成了安全隐患。经过分析这跟许多因素有关。比如地面是斜的，地面沙石松软、轮胎变形、折臂吊底盘安装可能不平等，但最主要原因是折臂吊本身的挠度。平面双连杆这种形式在吊重物时由于重力影响肯定会发生变性，产生向下的弯曲，导致油缸向吊机内侧倾斜。

后来我们的给整机安装了倾斜仪来测量车辆本身及地面的变形，并且根据吊臂的变形程度在视觉定位系统给出的位移偏差值上增加一个常量参数，用来修正产生的偏差。经过改进后，铺路机运行一切正常。

5. 总结

上文详述了整个折臂吊的模型建立，坐标的转换，视觉定位功能的原理。这些功能属于铺路机的核心算法。其他的比如路径规划，吸盘、油缸的工作等功能都可以简单的实现，不再赘述。

通过折臂吊，机器视觉系统在装配式道路敷设装置上的成功运用，实现了装配式预制板的自动识别，自动纠偏，自动拼装等功能，使自动化铺路的功能得以实现，提高了施工现场作业效率。也为雄安新区装配式道路、临时施工道路、装配式广场进行快速拆装、循环利用、绿色建筑等方面做出了自己的贡献。

参考文献

- [1] 中共中央、国务院. 中共中央、国务院对《北京城市副中心控制性详细规划(街区层面)(2016年~2035年)》的批复[Z], 2018.
- [2] 李桂娇, 张长春. 关节非线性的串联双连杆机械臂运动控制研究[J]. 机床与液压, 2019, 47(23): 83.
- [3] 王志江, 薛坤喜, 吴定勇, 等. 基于视觉传感的机器人焊缝纠偏控制系统[J]. 机械工程学报, 2019, 55(17): 48-55.
- [4] 陆拥军. 集装箱码头锁销自动化拆装视觉定位系统研究[J]. 港口装卸, 2019(2): 16-19.
- [5] Saeed B. Niku. 机器人学导论: 分析、控制及应用[M]. 第2版. 孙富春, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2013: 86-87.
- [6] 储昭碧, 王昊, 胡永新, 等. 洗车机二连杆机械臂定位控制策略及实现[J]. 制造业自动化, 2017, 39(8): 142-145.
- [7] 张平, 潘焕, 谭东才. 直臂吊和折臂吊的优劣性对比分析[J]. 科技创新导报, 2019(16): 45.