手眼标定（一）：Opencv4实现手眼标定及手眼系统测试

原创 jian_1996 于 2020-01-08 10:40:13 发布 20573 收藏 302 版权
分类专栏： 手眼标定 Opencv 文章标签： 计算机视觉

Opencv4实现手眼标定及手眼系统测试

前言

由于项目需要，要在win10环境下实现"眼在手上"的手眼系统，为此查阅了不少资料。但大多是理论资料，或者不可用的代码。虽然本人基于Halcon 12.0实现了手眼标定，但代码太冗余，效率低。因此本人拟通过Opencv4实现手眼标定。
（第一次写博客，不足之处敬请批评指正！）

1 程序环境

1. **编译器：Visual Studio 2015；**
2. **Opencv版本：Opencv3.4.6、或Opencv4以上版本；**

2 原理

（1）主要使用Opencv的calibrateHandEye()函数，其中包括五种方法，相关文献见链接link。
（2）本代码主要根据Tsai两步法进行，利用公式AX=XB，先计算旋转矩阵R，再计算平移矩阵T。
（3）Tsai两步法的原理可参考博主一"手眼标定"： link；博主二"机械臂的手眼标定 opencv实现"：link.

3 程序源码

主要参考github代码1： link；github代码2：link.
本人整理优化后的源码如下：

```
/*********************************************************************
说明：Opencv4实现手眼标定及手眼测试
作者：jian xu @CUG
日期：2020年01月08日
*********************************************************************/

#include <iostream>
#include <string>

#include <opencv2/opencv.hpp>
#include <opencv2/core.hpp>
#include <opencv2/imgproc.hpp>
#include <opencv2/calib3d.hpp>

//导入静态链接库
#if (defined _WIN32 || defined WINCE || defined __CYGWIN__)
#define OPENCV_VERSION "412"
#pragma comment(lib, "opencv_world" OPENCV_VERSION ".lib")

#endif

using namespace cv;
using namespace std;

//相机中13组标定板的位姿，x,y,z, rx,ry,rz,
Mat_<double> CalPose = (cv::Mat_<double>(13, 6) <<
    -0.072944147641399, -0.066878305620848944, 0.4340418493881254, -0.2207496117519063, 0.0256862005614321, 0.19
    -0.01969337858360518, -0.05095294728651902, 0.3671266719105768, 0.1552099329677287, -0.5763323472739464, 0.
    0.1358164536530692, -0.1110802522656379, 0.4001396735998251, -0.04486168331242635, -0.004268942058870162, 0
    0.1360676260120161, -0.002373036366121294, 0.3951670952829301, -0.4359637938379769, 0.00807193982932386, 0.
    -0.1047666520352697, -0.01377729010376614, 0.4570029374109721, -0.612072103513551, -0.04939465180949879, -0
    0.02866460103085085, -0.1043911269729344, 0.3879127305077527, 0.3137563103168434, -0.02113958397023016, 0.1
    0.1122741829392126, 0.001044006395747612, 0.3686697279333643, 0.1607160803445018, 0.2468677059920437, 0.103
    -0.06079521129779342, -0.02815190820828123, 0.4451740202390909, 0.1280935541917056, -0.2674407142401368, 0.
    -0.02475533256363622, -0.06950841248698086, 0.2939836207787282, 0.12606296719335844, -0.2637748974005461, 0.
    0.1128618887222624, 0.001178777221211125, 0.3362496409334229, 0.1049541359309871, -0.2754352318773509, 0.425
    0.1510545750008333, -0.07250199444548204, 0.3369908269102371, 0.2615745097093249, -0.1295598776133405, 0.697
    0.04885313290076512, -0.06488755216394324, 0.2441532410787161, 0.1998243391807502, -0.04919417529483511, -0
    0.08816140480523708, -0.05549965109057759, 0.3164905645998022, 0.1646936544482863, 0.1153894876338608, 0.014

//机械臂末端13组位姿,x,y,z,rx,ry,rz
Mat_<double> ToolPose = (cv::Mat_<double>(13, 6) <<
    -0.3969707, -0.460018, 0.3899877, 90.2261, -168.2015, 89.7748,
    -0.1870185, -0.6207147, 0.2851157, 57.2636, -190.2034, 80.7958,
    -0.1569776, -0.510021, 0.3899923, 90.225, -178.2038, 81.7772,
    -0.1569787, -0.5100215, 0.3299975, 90.2252, -156.205, 81.7762,
    -0.3369613, -0.4100348, 0.3299969, 90.2264, -146.2071, 71.778,
    -0.2869552, -0.6100449, 0.4299998, 90.2271, -199.2048, 86.7806,
    -0.2869478, -0.6600489, 0.4299948, 105.2274, -189.2053, 86.7814,
    -0.286938, -0.6300559, 0.4299997, 75.2279, -189.2056, 86.783,
    -0.2869343, -0.5700635, 0.2800084, 75.2291, -189.2055, 86.7835,
    -0.1669241, -0.5700796, 0.280015, 75.2292, -189.205, 101.7845,
    -0.236909, -0.4700997, 0.3600046, 87.2295, -196.2063, 118.7868,
    -0.2369118, -0.6201035, 0.2600001, 87.2297, -192.2087, 75.7896,
    -0.2468983, -0.620112, 0.359992, 97.2299, -190.2082, 80.7908);

//R和T转RT矩阵
Mat R_T2RT(Mat &R, Mat &T)
{
  M a t  RT;
  M a t _<double> R1 = (cv::Mat_<double>(4, 3) << R.at<double>(0, 0), R.at<double>(0, 1), R.at<double>(0, 2),
                                                  R.at<double>(1, 0), R.at<double>(1, 1), R.at<double>(1, 2),
                                                  R.at<double>(2, 0), R.at<double>(2, 1), R.at<double>(2, 2),
                                                  0.0, 0.0, 0.0);
   c  v::Mat_<double> T1 = (cv::Mat_<double>(4, 1) << T.at<double>(0, 0), T.at<double>(1, 0), T.at<double>(2, 0)

   c  v::hconcat(R1, T1, RT);//C=A+B左右拼接
    return RT;
}
```

```cpp
//RT转R和T矩阵
void RT2R_T(Mat &RT, Mat &R, Mat &T)
{
   cv::Rect R_rect(0, 0, 3, 3);
   cv::Rect T_rect(3, 0, 1, 3);
    R = RT(R_rect);
    T = RT(T_rect);
}

//判断是否为旋转矩阵
bool isRotationMatrix(const cv::Mat & R)
{
   cv::Mat tmp33 = R({ 0,0,3,3 });
   cv::Mat shouldBeIdentity;

 shouldBeIdentity = tmp33.t()*tmp33;

   cv::Mat I = cv::Mat::eye(3, 3, shouldBeIdentity.type());

    return  cv::norm(I, shouldBeIdentity) < 1e-6;
}

/** @brief 欧拉角 -> 3*3 的R
* @param  eulerAngle     角度值
*  @param   seq         指定欧拉角xyz的排列顺序如: "xyz" "zyx"
*/
cv::Mat eulerAngleToRotatedMatrix(const cv::Mat& eulerAngle, const std::string& seq)
{
    CV_Assert(eulerAngle.rows == 1 && eulerAngle.cols == 3);

 eulerAngle /= 180 / CV_PI;
  cv::Matx13d m(eulerAngle);
 auto rx = m(0, 0), ry = m(0, 1), rz = m(0, 2);
 auto xs = std::sin(rx), xc = std::cos(rx);
 auto ys = std::sin(ry), yc = std::cos(ry);
 auto zs = std::sin(rz), zc = std::cos(rz);

  cv::Mat rotX = (cv::Mat_<double>(3, 3) << 1, 0, 0, 0, xc, -xs, 0, xs, xc);
  cv::Mat rotY = (cv::Mat_<double>(3, 3) << yc, 0, ys, 0, 1, 0, -ys, 0, yc);
  cv::Mat rotZ = (cv::Mat_<double>(3, 3) << zc, -zs, 0, zs, zc, 0, 0, 0, 1);

  cv::Mat rotMat;

    if (seq == "zyx")   rotMat = rotX*rotY*rotZ;
    else if (seq == "yzx") rotMat = rotX*rotZ*rotY;
    else if (seq == "zxy") rotMat = rotY*rotX*rotZ;
    else if (seq == "xzy") rotMat = rotY*rotZ*rotX;
    else if (seq == "yxz") rotMat = rotZ*rotX*rotY;
    else if (seq == "xyz") rotMat = rotZ*rotY*rotX;
    else {
      cv::error(cv::Error::StsAssert, "Euler angle sequence string is wrong.",
     __FUNCTION__, __FILE__, __LINE__);
    }

    if (!isRotationMatrix(rotMat)) {
      cv::error(cv::Error::StsAssert, "Euler angle can not convert to rotated matrix",
     __FUNCTION__, __FILE__, __LINE__);
    }

    return rotMat;
    //cout << isRotationMatrix(rotMat) << endl;
}

/** @brief 四元数转旋转矩阵
* @note  数据类型double; 四元数定义 q = w + x*i + y*j + z*k
* @param q 四元数输入{w,x,y,z}向量
* @return 返回旋转矩阵3*3
*/
cv::Mat quaternionToRotatedMatrix(const cv::Vec4d& q)
{
 double w = q[0], x = q[1], y = q[2], z = q[3];

 double x2 = x * x, y2 = y * y, z2 = z * z;
 double xy = x * y, xz = x * z, yz = y * z;
 double wx = w * x, wy = w * y, wz = w * z;

  cv::Matx33d res{
       1 - 2 * (y2 + z2),  2 * (xy - wz),      2 * (xz + wy),
       2 * (xy + wz),      1 - 2 * (x2 + z2),  2 * (yz - wx),
       2 * (xz - wy),      2 * (yz + wx),      1 - 2 * (x2 + y2),
    };
    return cv::Mat(res);
}

/** @brief ((四元数||欧拉角||旋转向量) && 转移向量) -> 4*4 的Rt
*  @param   m      1*6  ||  1*10的矩阵  -> 6  {x,y,z, rx,ry,rz}   10 {x,y,z, qw,qx,qy,qz, rx,ry,rz}
* @param  useQuaternion   如果是1*10的矩阵, 判断是否使用四元数计算旋转矩阵
*  @param   seq         如果通过欧拉角计算旋转矩阵, 需要指定欧拉角xyz的排列顺序如: "xyz" "zyx" 为空表示旋转向量
*/
cv::Mat attitudeVectorToMatrix(cv::Mat& m,bool useQuaternion, const std::string& seq)
{
    CV_Assert(m.total() == 6 || m.total() == 10);
    if (m.cols == 1)
      m   = m.t();
   cv::Mat tmp = cv::Mat::eye(4, 4, CV_64FC1);

    //如果使用四元数转换成旋转矩阵则读取m矩阵的第第四个成员, 读4个数据
    if (useQuaternion)  // normalized vector, its norm should be 1.
    {
      cv::Vec4d quaternionVec = m({ 3, 0, 4, 1 });
        quaternionToRotatedMatrix(quaternionVec).copyTo(tmp({ 0, 0, 3, 3 }));
        // cout << norm(quaternionVec) << endl;
    }
    else
    {
      cv::Mat rotVec;
        if (m.total() == 6)
      rotVec  = m({ 3, 0, 3, 1 });     //6
        else
      rotVec  = m({ 7, 0, 3, 1 });     //10

        //如果seq为空表示传入的是旋转向量, 否则"xyz"的组合表示欧拉角
        if (0 == seq.compare(""))
          cv::Rodrigues(rotVec, tmp({ 0, 0, 3, 3 }));
        else
            eulerAngleToRotatedMatrix(rotVec, seq).copyTo(tmp({ 0, 0, 3, 3 }));
    }
    tmp({ 3, 0, 1, 3 }) = m({ 0, 0, 3, 1 }).t();
    //std::swap(m,tmp);
    return tmp;
```

```
}


int main()
{
    //定义手眼标定矩阵
  s t d::vector<Mat> R_gripper2base;
  s t d::vector<Mat> t_gripper2base;
  s t d::vector<Mat> R_target2cam;
  s t d::vector<Mat> t_target2cam;
 Mat R_cam2gripper = (Mat_<double>(3, 3));
 Mat t_cam2gripper = (Mat_<double>(3, 1));

 v e c t o r<Mat> images;
 size_t num_images =13;//13组手眼标定数据

    // 读取末端，标定板的姿态矩阵 4*4
  s t d::vector<cv::Mat> vecHg, vecHc;
   c v::Mat Hcg;//定义相机camera到末端grab的位姿矩阵
 Mat tempR,tempT;

    for (size_t i = 0; i < num_images; i++)//计算标定板位姿
    {
      c v::Mat tmp = attitudeVectorToMatrix(CalPose.row(i), false,""); //转移向量转旋转矩阵
    v e c H c.push_back(tmp);
        RT2R_T(tmp, tempR, tempT);

  R_t a r g e t 2 c a m.push_back(tempR);
  t_t a r g e t 2 c a m.push_back(tempT);
    }

    for (size_t i = 0; i < num_images; i++)//计算机械臂位姿
    {
      c v::Mat tmp = attitudeVectorToMatrix(ToolPose.row(i), false, "xyz"); //机械臂位姿为欧拉角-旋转矩阵
    v e c H g.push_back(tmp);
        RT2R_T(tmp, tempR, tempT);

  R_g r i p p e r 2 b a s e.push_back(tempR);
  t_g r i p p e r 2 b a s e.push_back(tempT);
    }
    //手眼标定，CALIB_HAND_EYE_TSAI法为11ms，最快
    calibrateHandEye(R_gripper2base, t_gripper2base, R_target2cam, t_target2cam, R_cam2gripper, t_cam2gripper, C

 H c g  = R_T2RT(R_cam2gripper, t_cam2gripper);//矩阵合并

 s t d::cout << "Hcg 矩阵为:  " << std::endl;
 s t d::cout << Hcg << std::endl;
 c o u t<<"是否为旋转矩阵: "<< isRotationMatrix(Hcg) << std::endl << std::endl;//判断是否为旋转矩阵

    //Tool_In_Base*Hcg*Cal_In_Cam，用第一组和第二组进行对比验证
 c o u t  << "第一组和第二组手眼数据验证: " << endl;
 c o u t  << vecHg[0] * Hcg*vecHc[0] << endl << vecHg[1] * Hcg * vecHc[1] << endl << endl;//.inv()

 c o u t  << "标定板在相机中的位姿: " << endl;
 c o u t  << vecHc[1] << endl;
 c o u t  << "手眼系统反演的位姿为: " << endl;
    //用手眼系统预测第一组数据中标定板相对相机的位姿，是否与vecHc[1]相同
 c o u t  << Hcg.inv()* vecHg[1].inv()* vecHg[0] * Hcg*vecHc[0] << endl << endl;

 c o u t  << "----手眼系统测试----" << endl;
 c o u t  << "机械臂下标定板XYZ为: " << endl;
    for (int i = 0; i < vecHc.size(); ++i)
    {
      c v::Mat cheesePos{ 0.0,0.0,0.0,1.0 };//4*1矩阵，单独求机械臂下，标定板的xyz
      c v::Mat worldPos = vecHg[i] * Hcg*vecHc[i] * cheesePos;
    c o u t  << i << ": " << worldPos.t() << endl;
    }
    getchar();
}
```

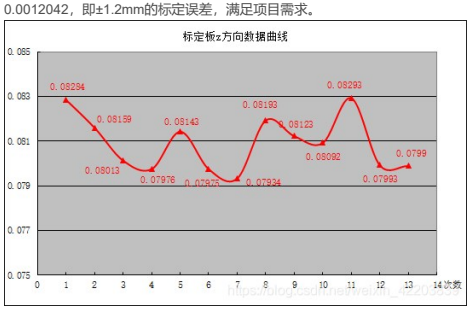
4 程序输出

```
Hcg 矩阵为:
[0.008453865805544414, -0.9990489305401753, 0.04277577047200548, 0.07638705395676357;
 0.01898771468630467, 0.04292996492156131, 0.9988976347968919, -0.08206354381579613;
 -0.9997839760888014, -0.007632332432839339, 0.01933258021323825, -0.1311098155037144;
 0, 0, 0, 1]
是否为旋转矩阵: 1

第一组和第二组手眼数据验证:
[-0.9827262517458556, 0.1843060418844967, 0.01674506059741485, -0.4457787409127387;
 0.1838216085000257, 0.9825904904541024, -0.02693592986383497, -0.6886150828753749;
 -0.02141799192277936, -0.02339254141892869, -0.9994969027605635, 0.08284331808916068;
 0, 0, 0, 1]
[-0.9824787510996111, 0.1850986855040433, 0.0217710877639008, -0.441259542992489;
 0.1843694850759817, 0.9823437476322023, -0.03175932084817229, -0.6894248600904512;
 -0.02726530048551778, -0.02718893364210982, -0.9992584076588193, 0.08159252779194137;
 0, 0, 0, 1]

标定板在相机中的位姿:
[0.8341198940795272, -0.1369737069955237, -0.5343053489276171, -0.01969337858360518;
 0.05021760995408052, 0.983511189246883, -0.1737352361401729, -0.05095294728651902;
 0.5492924484746335, 0.1180844791582967, 0.8272447411925057, 0.3671266719105768;
 0, 0, 0, 1]
手眼系统反演的位姿为:
[0.8373227680667449, -0.1343311553869149, -0.5299487925917564, -0.01514939120843839;
 0.05049903955148193, 0.9842033941157671, -0.1696865522526224, -0.05055927730944099;
 0.5443715909940763, 0.1153205085985169, 0.8308795046305798, 0.3684833472702467;
 0, 0, 0, 1]

----手眼系统测试----
机械臂下标定板XYZ为:
0: [-0.4457787409127387, -0.6886150828753749, 0.08284331808916068, 1]
1: [-0.441259542992489, -0.6894248600904512, 0.08159252779194137, 1]
2: [-0.4422208339914133, -0.6864831180641821, 0.08013587355743718, 1]
3: [-0.4434900953499247, -0.6870035574330987, 0.07976634930332338, 1]
4: [-0.4450797367777684, -0.6874268887433959, 0.08143249774989553, 1]
5: [-0.4418885185926491, -0.6886217895474291, 0.07975714114113902, 1]
6: [-0.4409575603391271, -0.6878847949543246, 0.07934926736540387, 1]
7: [-0.4418588641213109, -0.6896930064251171, 0.08193358154038349, 1]
8: [-0.4437857547008249, -0.6894962022042577, 0.08123334852187797, 1]
9: [-0.4434430428709751, -0.6885152411299985, 0.08092995069314945, 1]
10: [-0.4447502944365486, -0.6878924537730967, 0.08293636801126125, 1]
11: [-0.4422290895104752, -0.6884201696013612, 0.07993373823200106, 1]
12: [-0.4418946218302015, -0.6878072561612861, 0.07990104035206125, 1]
```

5 数据分析

使用excel绘制机械臂坐标系下标定板z方向的数据，获得下图曲线。之后使用excel的STDEV函数求均方差，得到z方向的误差为

0.0012042，即±1.2mm的标定误差，满足项目需求。



6 总结

（1）机械臂位姿类型有xyz，zyx，zyz几种，注意区分（可以找机械臂公司问）。
（2）注意弄清楚手眼矩阵的方向！！！
（3）采集标定数据时，标定板拍摄视角尽可能大，如此标定精度更高。

（原创不易。若有用，请左下角点赞，谢谢！）

文章知识点与官方知识档案匹配，可进一步学习相关知识

OpenCV技能树 > 首页 > 概览　20740 人正在系统学习中

【MachineVision】Hand-Eye-Calibration　zhy29563　1190
1. 眼在手上 标定过程 标定板放置在固定位置，机器人变换不同的姿态，相机获取不同姿态下的标定板图像 目标 上图中描述了闭环的坐标系空间关系，包…

经典手眼标定算法C++代码　03-21
经典手眼标定算法C++代码，程序是基于OpenCV 2.0以上版本，下载程序后需要配置OpenCV。工程主要包括三个文件，handeye.h为各种手眼标定的实…

【OpenCV】机器人手眼标定原理及calibrateHandEye使用　9-11
根据以上分析,无论是眼在手上还是眼在手外,都最终转换成对方程AX=BX的求解。OpenCV提供了手眼标定求解的算子calibrateHandEye。 void cv::calibrat…

机器人手眼标定_慢下去、静下来的博客　9-8
spm_id_from=333.788.recommend_more_video.2　Opencv在Opencv4以后有一个专门用于手眼标定的函数calibrateHandeye() ,直接调用即可,里头集…

3D视觉工坊-手眼标定（附opencv实现代码）　z504727099的博客　6018
1.基本介绍 手眼标定两种形式 眼在手外 eye to hand 眼在手上 eye in hand 2.公式推导 眼在手上类似 3.方程AX=XB求解 4.opencv完成手眼标定 5.初学者…

基于opencv的手眼标定算法详解一----------opencv之相机标定函数calibrateCamera（）介绍　qq_656236576的博客　3544
手眼标定问题描述 在机器人校准测量、机器人手眼协调以及机器人辅助测量等领域，都要求知道机器人执行器末端（抓取臂）坐标系和传感器（比如用来…

物体位姿估计精度验证实验（涉及位姿估计，手眼标定，机械臂运动）　qq_34782535的博客　5069
物体位姿估计精度验证实验（涉及位姿估计，相手眼标定，机械臂运动）1.位姿估计2.手眼标定Opencv 手眼标定函数calibrateHandEye()（1）Eye in Han…

关于手眼标定的误差计算　qq_45445740的博客　1802
通过样本标准差计算手眼标定误差。

手眼标定实战(二)-基于opencv的Eye to Hand相机标定　向阳而生　6237
在手眼系统的坐标系理论变换中，从像素坐标到机器人坐标系转换过程中需要经过内参矫正、外参矩阵平移旋转的变换。本章节将进一步讨论手眼系统在…

OpenCV手眼标定（calibrateHandeye()）　热门推荐　hello　3万+
文章目录说明Code实验效果参考 说明 Code #include <opencv2/opencv.hpp> #include <iostream> #include <math.h> using namespace std; using nam…

Amy-Tabb机器人世界手眼标定（4、Windows）　jiangqixing0728的博客　332
导师要求在windows下运行。最大的难题其实是ceres solver。即Ceres这个迭代器的编译。 参考官网：Ceres Solver — A Large Scale Non-linear Optimiz…

机器人手眼标定快速精度验证方法　laoli_的博客　2329
机器人手眼标定快速精度验证方法

机器人学（三）：手眼标定（eye to hand）　行者无疆的博客　1021
主要讲了eye-to-hand的手眼标定算法，从原理到方程解法再到算法实现，简单明了，容易在实际系统中进应用

VC2017+OPENCV4.30实现机器人与传感器的手眼标定，亲测可用　06-02
使用VC2017结合OPENCV4.30实现机器人坐标系与传感器坐标系的手眼标定。可以计算出机器人的工具坐标系和传感器坐标系的相对位置关系矩阵。自…

基于opencv的相机手眼标定程序（一键运行十秒完成标定）.rar　03-28
基于opencv的相机手眼标定程序，采用C++进行开发，设置好参数一键运行即可完成手眼标定，可用于机械臂开发中状态转移矩阵的标定。博主大学做机…

记录Opencv手眼标定的过程　weixin_41698305的博客　3260
参考文献 参考文献1：OpenCV手眼标定（calibrateHandeye()） 参考文献2:【OpenCV3学习笔记 】相机标定函数 calibrateCamera( ) 使用详解（附相机…

（已修正精度 1mm左右）Realsense d435i深度相机+Aruco+棋盘格+OpenCV手眼标定全过程记录　Thinkin9的博客　1万+
最近帮别人做了个手眼标定，然后我标定完了大概精度能到1mm左右。所以原文中误差10mm可能是当时那个臂本身的坐标系有问题。然后用的代码改成…

Python-opencv 手眼标定（九点定位）　fhjsdk的博客　5552
本文主要解决相机像素坐标转换机械臂坐标的问题，用到的opencv版本为4.5.5.64一、手眼定位原理？ 以下可以参考基于OpenCv的机器人手眼标定（九…

python 手眼标定OpenCV手眼标定（calibrateHandeye()）一　weixin_43134049的博客　1万+
以下代码来源 本篇博客通过该代码，附上记录的公式与查找连接，方面以后调用能弄懂各个参数的意思 1.参数说明 calibrateHandeye() 参数描述如下：R…

opencv 手眼标定　最新发布　06-21
回答1： OpenCV手眼标定是一个基于计算机视觉技术的手眼标定方法。在机器人自主定位和导航方面具有重要的应用价值。 手眼标定是指在机器人…