

大学第 7 组云台控制（火控）系统算法设计

陈旭

1. 方案简述

1.1 确定云台基座坐标系

O_{gli} 坐标系，详见《大学 7 组空地机器人坐标系标定》；

1.2 确定可测信息

云台运动信息：云台角度，角速度（陀螺，码盘反馈）；

自动车运动信息：自动车位置，速度（码盘，单轴陀螺反馈）；

目标相对运动信息：打击目标的相对位置，相对速度（视觉 PnP，激光雷达检测）。

1.3. 确定可控对象

云台电机 q 相电流指令值 $i_{q_{ref}}$ 。

1.4. 确定工作方式

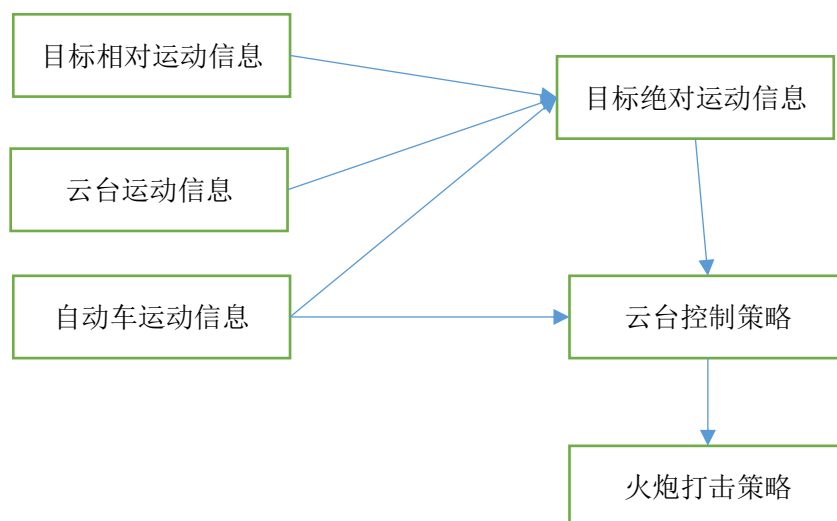


图 1.4.1. 云台系统工作方式图

2. 方案具体内容:

2.1. 信息内容

目标相对运动状态向量:

$$\begin{aligned} & \mathbf{X}_{tg2car_{act}} \\ &= [\mathbf{x}_{tg2car_{act}}; \mathbf{y}_{tg2car_{act}}; \mathbf{z}_{tg2car_{act}}; \frac{dx}{dt}_{tg2car_{act}}; \frac{dy}{dt}_{tg2car_{act}}; \frac{dz}{dt}_{tg2car_{act}}] \end{aligned}$$

云台运动状态向量:

$$\mathbf{X}_{gli_{act}} = [\mathbf{yaw}_{gli_{act}}; \mathbf{pitch}_{gli_{act}}; \frac{dyaw}{dt}_{gli_{act}}; \frac{dpitch}{dt}_{gli_{act}}]$$

自动车运动状态向量:

$$\begin{aligned} & \mathbf{X}_{car_{act}} = \\ & [\mathbf{x}_{car_{act}}; \mathbf{y}_{car_{act}}; \mathbf{z}_{car_{act}}; \frac{dx}{dt}_{car_{act}}; \frac{dy}{dt}_{car_{act}}; \frac{dz}{dt}_{car_{act}}]。 \end{aligned}$$

2.2. 可控对象内容

$$\mathbf{U}_{iq_{ref}} = [\mathbf{iq}_{yaw_{ref}}; \mathbf{iq}_{pitch_{ref}}]$$

2.3. 控制策略

利用得到的相关信息, 结合重力和空气动力学等因素, 可计算打击点的位置相对于时间的函数 $\mathbf{pos}_{attack}(t)$ 。进而转化为云台状态指令函数向量:

$$\begin{aligned} & \mathbf{X}_{gli_{ref}}(t) \\ &= [\mathbf{yaw}_{gli_{ref}}; \mathbf{pitch}_{gli_{ref}}; \frac{dyaw}{dt}_{gli_{ref}}; \frac{dpitch}{dt}_{gli_{ref}}] \end{aligned}$$

由于云台状态向量 $\mathbf{X}_{gli_{act}}$ 各项内容均可测, 将云台状态指令函数 $\mathbf{X}_{gli_{ref}}(t)$ 作为一输入信号, 设计能够使得 $\mathbf{X}_{gli_{act}}(t)$ 对于 $\mathbf{X}_{gli_{ref}}(t)$ 达到最优跟踪的最优控制器。

2.4. 控制器设计

首先对云台控制系统建模（如果无法建模，将采用系统辨识的方法近似）：

$$\dot{X}' = A * x + b(X, u) \text{ (非线性) } ;$$

$$Y = E * X;$$

其中：系统状态 $X = X_{gli_{ref}}$ ；

系统输入 $u = U_{iq_{ref}}$

E 为单位阵；

状态 X 中的全部元素均为可测量。

为了求解最优输出跟踪问题，首先对云台系统模型进行反馈线性化：

定义一个输入变换：

$$u = U_{trans}(X, v);$$

使得原系统转化为一个等价的定常线性系统

$$\dot{X}' = A * X + B * v;$$

利用跟踪最优控制的方法，设计控制器。

(a) 给定系统： $\dot{X}' = A * X + B * v$

$$Y = C * X$$

其中 X 为状态向量；v 为原系统反馈线性化后的控制向量 A 为状态转移矩阵，B 为输入矩阵，C 为输出矩阵，因为 X 中的系统状态均可测，故 C 暂时可取单位阵 E；

(b) 综合性能指标：

$$J = \frac{1}{2} e^T(t_1) S e(t_1) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} [e^T(t) Q(t) e(t) + u^T(t) R(t) u(t)] dt$$

其中： $e(t) = X_{gli_{ref}}(t) - X_{gli_{act}}(t)$ ，为误差函数；

t1为终端时刻（预计开火时刻）；

S 为终端性能指标（评定发射时刻 t1 的云台状态误差 e(t1) 对性能指标影响程度的定常矩阵）（评价打击是否准确）；

Q(t) 为过程性能指标（评定云台调节过程中的误差对性能指标的影响程度，可以为时变矩阵）（评价收敛过程快慢）；

$R(t)$ 为输入性能指标（评定云台调节过程中的输入对性能指标的影响程度，可以为时变矩阵）（评价输入能量大小）。

根据射击参数，确定各个性能指标函数,进而确定综合性能指标 J 。

(c)求解控制率，使得综合性能指标 J 取最小：

求解方法：变分法：构造哈密尔顿函数，得到正则方程组（状态方程和协态方程），输入方程，横截条件，边界条件等，转化为求解黎卡提方程的问题：

- 1, 求解黎卡提方程满足边界条件的解 $P(t)$ ；
- 2, 利用 $P(t)$ ，求解满足边界条件的解向量 $q(t)$
- 3, $P(t), q(t)$ 带入，可以求得最优控制率

$$v^* = -R^{-1}(t)B^T(t)P(t)x + R^{-1}(t)B^T(t)q(t)$$

至此，控制律设计完成，且能够使得综合性能 J 指标取得极小值。

（关于求解方法,mathmetica 和 Matlab 都提供了很成熟的函数，故难度不大）

3. 可能存在的问题及解决方法

问题 1：获取的目标运动信息的精度和采样带宽的问题

解决方法：需实验验证；

问题 2：炮弹动力学模型是否准确：

解决方法：建模尽可能细化，然后通过实验修正参数，并制定较为完善的校正方案，便于在比赛前迅速修正参数。

问题 3：计算量问题：

解决方法：动态性能指标定常化，同时简化终端性能指标，用“检测到位后就进行射击”进行代替，进而可以使它转化为无限时间调节器的问题，从而使得计算中间量 $P(t)$ 转换为定常矩阵 P , 从而可以使计算量和存储量均大大减小)；