

doi: 10.7690/bgzdh.2020.03.021

# 一种基于测距信号的距离变化率观测器

林云, 张民

(南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

**摘要:** 为解决直接测量距离变化率信号时测量困难且精度较低的问题, 设计一种基于测距信号的距离变化率观测器。设计距离变化率观测器, 结合李雅普诺夫稳定性的证明, 利用在机器人上安装的距离传感器及信号接收装置, 通过解算控制变量, 构建加入扰动信号的仿真模型, 并将其应用于可移动地面机器人的编队制导中进行实验验证。仿真结果表明: 该观测器能有效实现距离变化率解算, 可以满足工程技术需求。

**关键词:** 测距; 距离变化率; 李雅普诺夫函数; 李雅普诺夫稳定性

**中图分类号:** TP23 **文献标志码:** A

## A Range Rate Observer Based on Ranging Signal

Lin Yun, Zhang Min

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** For solving these problems of hard to measurement and low accuracy in direct measuring range rate, design the range rate observer based on ranging signal. Design a distance change rate observer, combine with the Lyapunov stability verification, use the ranging sensor and signal receiver equipment, establish simulation model with disturbance signal by solving control variable. Use it in portable ground robot formation navigation. The simulation results show that the observer can effectively solve the range rate and meet the engineering and technical requirements.

**Keywords:** range; range rate; Lyapunov function; Lyapunov stability

### 0 引言

随着控制科学的研究和发展, 无论是控制单一个体还是多成员构成的编队, 都需要多种控制信号<sup>[1-2]</sup>。受限于当前的技术条件, 很难准确测量部分控制信号, 甚至根本无法通过测量获知; 因此, 需要提供基于当前技术手段能够准确测量的信号, 求解得到所需要的信息。这种观测器不仅要实时求解应用中需要的信号, 还要有不错的抗干扰能力, 而且不能因为自身不足影响整体控制的快速性、准确性、稳定性。

当前, 对于可移动成员的编队制导控制研究, 在实际应用中有很大的价值, 比如无人机、无人车、地面机器人等。这其中就包括一个很重要的控制信号——距离变化率<sup>[3-4]</sup>, 而距离变化率是一种不易精确测量的控制变量。现在已有一些可以得到距离变化率的方法, 如: 利用精密测距模拟器<sup>[5]</sup>进行间接测量; 利用激光测距仪, 结合卡尔曼滤波解算距离变化率<sup>[6]</sup>; 把距离变化率作为状态变量, 基于模型的状态观测器解算<sup>[7]</sup>等。

笔者设计的观测器, 在现有方法基础上, 为求

解距离变化率问题提供了一种简单易行的方法, 可以满足基于距离信号的距离变化率信号的解算; 同时为其他测量信号的类似问题提供一种思路。

### 1 相关内容

#### 1.1 距离变化率观测器设计

考虑如下的距离变化率解算微分方程组:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{s}} &= \hat{s} + a|s - \hat{s}| \operatorname{sgn}(s - \hat{s}) \\ \dot{\hat{s}} &= b|s - \hat{s}| \operatorname{sgn}(s - \hat{s}) + c(s - \hat{s}) \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

其中:  $a, b, c$  为增益;  $\operatorname{sgn}(\bullet)$  为符号函数,  $\operatorname{sgn}(s - \hat{s}) =$

$$\begin{cases} 1 & s - \hat{s} > 0 \\ -1 & s - \hat{s} < 0 \end{cases}; s \text{ 为距离}; \hat{s} \text{ 为距离求解量}; \dot{\hat{s}} \text{ 为距}$$

离求解量的导数;  $\hat{s}$  为距离变化率的观测值;  $\dot{\hat{s}}$  为距离变化率观测量的导数。其中, 距离信号用现有的声波测距传感器测量得到。

#### 1.2 距离变化率观测器稳定性证明

定义变量  $x_1 = s - \hat{s}$ ,  $x_2 = \dot{s} - \dot{\hat{s}}$ , 由此得到  $\dot{x}_1 = \dot{s} - \dot{\hat{s}}$ ,  $\dot{x}_2 = \ddot{s} - \ddot{\hat{s}}$ ; 定义函数  $g(t, x_1, x_2)$ , 其满足

收稿日期: 2019-11-20; 修回日期: 2019-12-10

作者简介: 林云(1994—), 男, 内蒙古人, 硕士, 从事先进飞行控制技术研究。E-mail: 1585145838@qq.com。

$|g(t, x_1, x_2)| \leq \mu_1 |x_1| + \mu_2 |x_2|$ ,  $\mu_1$  和  $\mu_2$  表示扰动, 且满足  $\mu_1 > 0$ ,  $\mu_2 > 0$ 。则式(1)可改写为:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= -a|x_1| \operatorname{sgn}(x_1) + x_2 \\ \dot{x}_2 &= -b|x_1| \operatorname{sgn}(x_1) + cx_1 + g(t, x_1, x_2) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

定义变量  $\eta = [|x_1| \operatorname{sgn}(x_1), x_1, x_2]^T$ , 提出李雅普诺夫函数

$$L = \eta^T J \eta. \quad (3)$$

其中  $J = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 4b+a^2 & ad & -a \\ ad & \frac{1}{2}c+d^2 & -d \\ -a & -d & 2 \end{bmatrix}$ , 且  $d > 0$ 。对式(3)

求导, 得到

$$\dot{L} = -\eta^T Z_1 \eta - \eta^T Z_2 \eta + 2x_2 g(t, x_1, x_2) - (a|x_1| \operatorname{sgn}(x_1) + dx_1)g(t, x_1, x_2). \quad (4)$$

其中:  $Z_1 = \begin{bmatrix} (a^3+4ab) & 0 & -(2b+a^2) \\ 0 & ad^2 + \frac{3}{4}ac - bd & -\frac{3}{2}ad + b \\ -(2b+a^2) & -\frac{3}{2}ad + b & a \end{bmatrix}$ ;

$$Z_2 = \begin{bmatrix} 2a^2d - ab & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{4}cd & -\frac{1}{2}(c+d^2) \\ 0 & -\frac{1}{2}(c+d^2) & d \end{bmatrix}.$$

因为  $|g(t, x_1, x_2)| \leq \mu_1 |x_1| + \mu_2 |x_2|$ , 进而得到

$$|2x_2 g(t, x_1, x_2)| \leq 2\mu_1(|x_1|^2 + |x_2|^2) + 2\mu_2 x_2^2. \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & |(a|x_1| \operatorname{sgn}(x_1) + dx_1)g(t, x_1, x_2)| \leq \\ & a|x_1|^2 \mu_1 + d\delta_1 |x_1|^2 + \frac{1}{2}a\mu_2(|x_1| \operatorname{sgn}(x_1))^2 + \\ & \frac{1}{2}a\mu_2 x_2^2 + d\mu_2 x_1 x_2 = a\mu_1 |x_1|^2 + d\mu_1 |x_1|^2 + \\ & \frac{1}{2}a\mu_2 |x_1|^2 + \frac{1}{2}a\mu_2 x_2^2 + d\mu_2 x_1 x_2. \end{aligned} \quad (6)$$

将式(5)、(6)代入(4), 得到

$$\dot{L} \leq -\eta^T Z_1 \eta - \eta^T Z_2 \eta + \eta^T Z_3 \eta + \eta^T Z_4 \eta.$$

其中:  $Z_3 = \begin{bmatrix} 2\mu_1 + a\mu_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2\mu_1 \end{bmatrix}$ ,  $Z_4 =$

$$\begin{bmatrix} d\mu_1 + \frac{1}{2}a\mu_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}d\mu_2 \\ 0 & \frac{1}{2}d\mu_2 & \frac{1}{2}a\mu_2 + 2\mu_2 \end{bmatrix}.$$

因为  $Z_1 + Z_2 - Z_3 - Z_4$  是正定的, 所以  $\dot{L} \leq -\eta^T (Z_1 - Z_3) \eta$ ; 因为  $\eta^T (Z_1 - Z_3) \eta \geq \lambda_{\min}(Z_1 - Z_3) \|\eta\|^2$ , 所以  $\dot{L} \leq -\lambda_{\min}(Z_1 - Z_3) \|\eta\|^2 \leq -\lambda_{\min}(Z_1 - Z_3) \|\eta\|$ ,  $\lambda_{\min}(\bullet)$  表示正定对称矩阵的最小特征值; 因为  $L \leq \lambda_{\max}(J) \|\eta\|^2$ , 所以  $\|\eta\| \geq \frac{1}{\sqrt{\lambda_{\max}(J)}} L^{\frac{1}{2}}$ ,  $\lambda_{\max}(\bullet)$  表示正定对称矩阵的最大特征值。

综合上述分析, 推出

$$\dot{L} \leq -\frac{\lambda_{\min}(Z_1 - Z_3)}{\sqrt{\lambda_{\max}(J)}} L^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

对式(7)两边积分, 积分区间为  $[0, t]$ , 得到

$$2\sqrt{L(t)} \leq 2\sqrt{L(0)} - \frac{\lambda_{\min}(Z_1 - Z_3)}{\sqrt{\lambda_{\max}(J)}} t. \quad (8)$$

由式(8)可知, 在一定时间内,  $L$  趋于 0。综合分析式(3)、式(8), 根据李雅普诺夫稳定性判别定理可知, 当  $L > 0$  且  $\dot{L} < 0$  时, 式(2)对应的系统处于平衡状态, 此时计算得到参数范围  $0 < a < 2.5$ ,  $b > \frac{3}{4}\mu_1$ ,  $c > 0$ ,  $d > 0$ 。当  $L = 0$ , 对应平衡点  $(x_1, x_2) = (0, 0)$ 。由此可知: 式(1)对应的系统也是收敛的, 且对应的平衡点  $(s, \hat{s}) = (\hat{s}, \hat{s})$ 。

## 2 实验模型

### 2.1 基于距离及距离变化率信号的仿真模型

笔者提供的距离变化率观测器可以广泛应用于需要距离变化率的控制场景中。笔者以地面可移动机器人编队制导为例, 验证文中的距离变化率观测器有效。其模型如图 1。

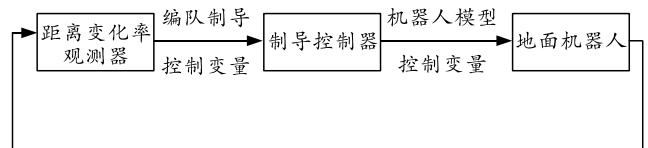


图 1 机器人编队制导模型

其中, 编队制导控制变量为距离及距离变化率, 机器人模型控制变量为线速度及角速度。整个实验是利用机器人上安装的距离传感器及信号接收装置, 通过解算控制变量, 使处于任意位置的多台机器人经过一段时间后, 可以围绕一个固定目标点持续作圆周运动, 且各台机器人均匀分布在圆周上。

### 2.2 基于加入扰动信号的仿真模型

为了验证距离变化率解算器具有的抗干扰特性, 在图 1 中加入一定的扰动, 其模型如图 2 所示。

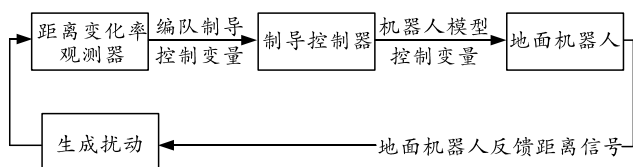


图 2 加扰动的机器人编队制导模型

扰动测试以高斯噪声为例, 其余部分与图 1 所示模块完全相同。

## 3 实验结果及分析

### 3.1 无噪声干扰仿真

实验中, 各机器人及目标点的状态如表 1 所示。

表 1 机器人及目标点状态

名称	坐标/m	方向角 $\psi/(^\circ)$
目标 1	(1 000,1 000)	0
目标 2	(2 000,2 000)	0
机器人 1	(0,1 500)	20
机器人 2	(-500,500)	50
机器人 3	(-500,-500)	100
机器人 4	(0,0)	100

整个仿真过程包括 2 部分, 仿真时间共 2 000 s。笔者使用 Matlab2016b 作为仿真平台。前 1 000 s, 编队以目标 1 为目标点, 在完成制导编队任务后, 目标点改为目标 2, 其中 1 台机器人脱离编队, 其余机器人继续完成制导编队任务。编队运动轨迹结果如图 3; 将测距传感器测得的距离信号用 Matlab 仿真中的微分模块进行微分, 作为实际距离变化率, 与文中的观测器进行对比。仿真结果如图 4。

实验结果表明: 观测器观测得到的距离变化率信息只在实验开始阶段有微小偏差, 一段时间之后与实际距离变化率基本相同, 观测器提供的距离变化率信息可以准确帮助机器人制导, 很好地完成实验要求。以上分析说明: 文中的方法对于解算距离变化率有效, 精确度较高, 稳定性良好, 能够满足实际工程需要。

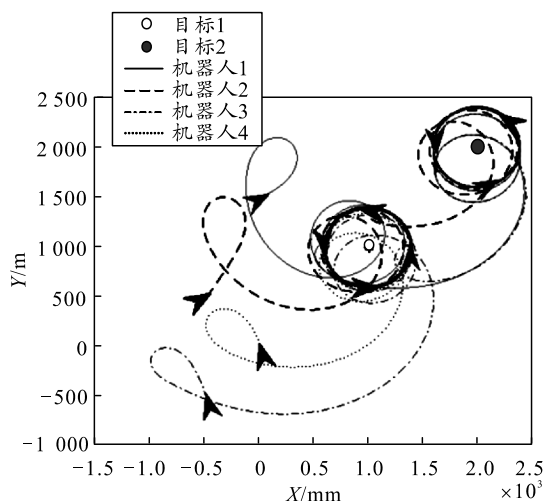


图 3 机器人编队轨迹

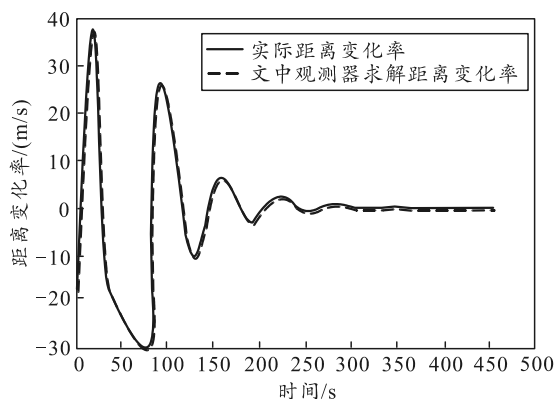


图 4 实际距离变化率与文中观测器求解值对比

### 3.2 有噪声干扰仿真

在实验中加入高斯噪声作为扰动, 重复 3.1 中的实验, 得到的运动轨迹结果如图 5, 距离变化率对比如图 6。可以看出: 该方法具有一定的抗干扰能力, 加入高斯噪声扰动不会对实验造成很大影响。

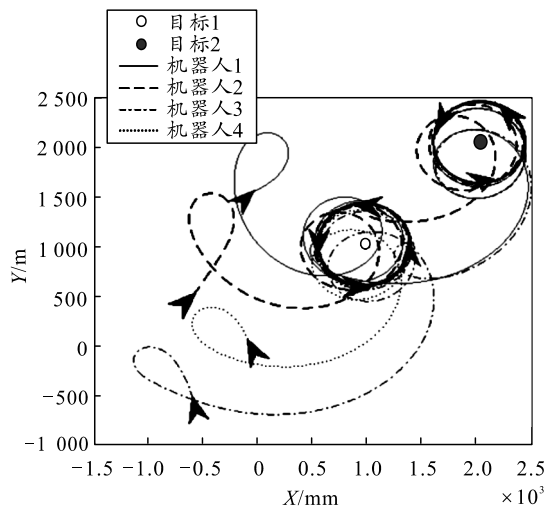


图 5 加扰动后机器人编队轨迹

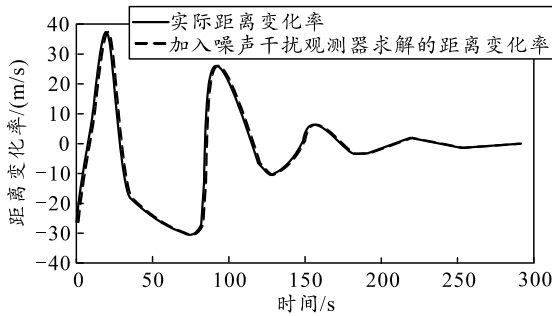


图 6 加扰动后实际距离变化率与文中观测器求解值对比

### 3.3 与现有实例对比仿真

将文中的实验场景与现有的方法<sup>[7]</sup>结合，得到观测器方程如下，

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{r}} &= \hat{r} + k_1(r - \hat{r}) \\ \dot{\hat{v}} &= k_2(r - \hat{r}) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中： $k_1$ 、 $k_2$ 表示增益系数； $r$ 表示距离信号； $\hat{r}$ 表示距离求解量； $\dot{\hat{r}}$ 表示距离求解量的导数； $\hat{v}$ 表示距离变化率的求解值； $\dot{\hat{v}}$ 表示距离变化率的求解量的导数。

将实际的距离变化率与式(1)、式(9)用观测器求得的距离变化率相比，结果如图 7 所示。可以看出：现有观测器计算的距离变化率在实验开始阶段振荡非常明显，与文中观测器求得的距离变化率相比，其与实际距离变化率的偏差较大；经过一段时间后，距离变化率趋于稳定后，现有观测器较文中的方法，需要更长的时间来实现与实际距离变化率的重合。

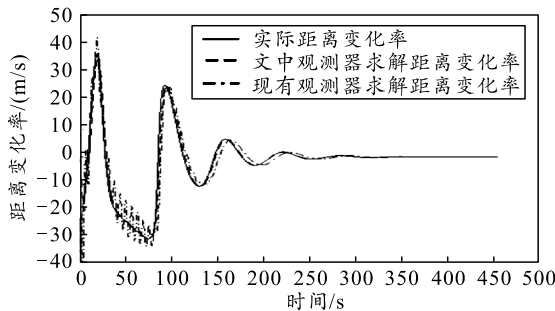


图 7 实际距离变化率、文中观测器以及现有观测器距离变化率对比

综合上述分析可以看出：较之前的方法，笔者提供的方法收敛的快速性以及与实际距离变化率对比的准确性都有很大提升。

## 4 结论

笔者介绍了一种基于测距信号的距离变化率解算方法。通过数学上的稳定性及结合实际的模型仿真结果证明：该方法求出的距离变化率具有很好的稳定性、快速性、准确性，并且有不错的抗干扰能力；与现有的方法对比，其性能有很好的提升。实验结果表明，该观测器能准确有效地解决基于测距信号的距离变化率求解问题。

## 参考文献：

[1] YU X, LIU L. Distributed Formation Control of Nonholonomic Vehicles Subject to Velocity Constraints[J]. in IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(2): 1289-1298.

[2] YU X, LIU L. Target Enclosing and Trajectory Tracking for a Mobile Robot With Input Disturbances[J]. in IEEE Control Systems Letters, 2017, 1(2): 221-226.

[3] MILUTINOVIĆ D, CASBEER D, CAO Y. et al. Kingston. Coordinate frame free Dubins vehicle circumnavigation[M]. 2014 American Control Conference, Portland, OR, 2014: 891-896.

[4] Arie Levant Robust exact differentiation via sliding mode technique Automatica[J]. 1998, 34(3):379-384.

[5] 程翔昕, 行江, 张伟. 精密测距模拟器距离变化率参数的校准方法[J]. 计量与测试技术, 2014, 41(5): 48-49.

[6] 杨东春, 赵春慧, 顾冬晴. 基于激光测距和惯导的非合作目标远程交会相对导航算法研究[J]. 上海航天, 2016, 33(4): 75-80.

[7] 蒋继成, 姚钢, 赵孝文. 基于观测器的加速度获取方法仿真研究[J]. 自动化技术与应用, 2018, 37(11): 178-180.

[8] SHKOLNIKOV I A, SHTESSEL Y B, LIANOS D P. (2005). Effect of sliding mode observers in the homing guidance loop[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2019(2): 103-111.

\*\*\*\*\*

(上接第 92 页)

[3] 李政红, 郭秀红, 汪珊. 便携式水质分析仪的技术特点和质量保证[J]. 水文, 2006, 26(6): 57-59, 96.

[4] 蒋新松, 封锡盛, 王隼棠. 水下机器人[M]. 沈阳: 沈阳科学技术出版社, 2000.

[5] 韩晓东, 王坚茹, 孟秀清. 水下航行体几个外形对阻力

影响的数值模拟[J]. 机械, 2011(9): 15-18.

[6] 廖煜雷, 庞永杰, 庄佳园. 无人水面艇嵌入式基础运动控制系统研究[J]. 计算机科学, 2010, 37(9): 214-217.

[7] 欧阳利, 顾磊. 新型远距离救生抛投器的研发与应用[J]. 消防技术与产品信息, 2012, 12: 29-32.