第 26 卷第 10 期
2009 年 10 月

控 制 理 论 与 应 用
Control Theory & Applications

Vol. 26 No. 10
Oct. 2009

文章编号: 1000−8152(2009)10−1148−03

水下机器人广义预测控制算法及能耗问题研究

徐建安, 任立国, 杨立平, 张铭钧

(哈尔滨工程大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 对水下机器人, 本文把输出量的变化作为系统优化目标, 提出了一种广义预测控制算法, 使其能够抑制各种噪声引起的输出波动, 从而减少了系统的能量消耗. 水下机器人艏向速度在线控制水池实验的结果验证了在满足设定控制指标的条件下能够抑制水下机器人艏向速度波动和减少能量消耗.

关键词: 水下机器人; 广义预测控制; 能量消耗

中图分类号: TP242.6　　**文献标识码**: A

Generalized predictive control and energy consumption analysis of autonomous underwater vehicle

XU Jian-an, REN Li-guo, YANG Li-ping, ZHANG Ming-jun

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang 150001, China)

Abstract: For an autonomous underwater vehicle(AUV), we adopt the variations of outputs as the system optimization objective and propose a generalized predictive control(GPC) algorithm for rejecting the fluctuations caused by various noises and reducing the energy consumption. Experiments of online control of the yaw velocity on an AUV show that it is effective to reduce the energy consumption while meeting the required performance indices.

Key words: autonomous underwater vehicle; generalized predictive control; energy consumption

1 引言(Introduction)

自治式水下机器人AUV的交叉耦合性、非线性、时变性都很严重, 其控制技术比较复杂[1]. 对于AUV来说, 一次下潜所携带的能源是有限的, 如何有效利用能源是AUV研究的重要问题之一. 广义预测控制算法对复杂对象、模型辨识误差、传感器噪声以及被控系统的时滞和阶次不确定表现出良好的鲁棒性. 对于基于广义预测控制算法的AUV运动控制, 文献[2]利用模型预测控制算法进行了QinetiQ水下机器人艏向运动的预测控制仿真研究, 文献[3]利用广义预测控制算法进行了船舶横向运动的控制仿真研究. 上述文献中预测控制算法在AUV或船舶运动控制方面上取得了良好的控制效果, 但并没有考虑被控对象的能量消耗问题. 在考虑能耗的AUV控制技术的研究方面, 目前研究成果较少, 张奇峰等设计了基于系统能量消耗最小的系统协调运动规划算法, 仿真结果表明该算法在解决系统冗余度的同时有效地减小了系统能量消耗[4]. 该研究主要是针对水下机器人–机械手的运动学冗余系统, 并没有考虑AUV运动控制中的能量消耗问题, 且一般AUV的推进器是没有冗余的. 本文针对AUV的预测控制和能量消耗问题, 在分析传统广义预测算法的基础上, 在其性能指标函数中增加抑制控制器输出波动的目标量, 通过调整其加权系数来抑制控制系统输出量的波动, 以减少AUV运动过程中推进器的能量消耗, 以“海狸”AUV为试验样机, 通过与广义预测控制算法相比较, 进行了AUV运动控制性能和能量消耗的水池实验与分析.

2 改进的广义预测控制算法(Improved generalized predictive control)

2.1 能量消耗计算(Energy consumption calculation)

AUV运动过程中所消耗的能量主要考虑推进器运转所需要的能量, 利用式(1) 计算其能量消耗[5]:

$$Q=\int_{t_{\rm o}}^{t_{\rm f}} u^2{\rm d}t. \tag{1}$$

式(1)中: u为控制量, $t_{\rm o}$为开始控制时间, $t_{\rm f}$为结束控制时间.

收稿日期: 2008−05−24; 收修改稿日期: 2008−12−24.
基金项目: 黑龙江省杰出青年科学基金资助项目(2005F030605); 教育部博士点基金资助项目(20070217017).

2.2 考虑加速度的广义预测控制算法(Generalized predictive control with acceleration considering)

传统广义预测控制只将输出预测误差和控制增量作为系统控制优化目标, 而没有充分考虑输出量如何跟踪参考输入. 考虑AUV能耗的最小化, 为避免由于传感器噪声或外界干扰等因素造成输出量产生超调从而产生较大的波动, 而不能满足AUV输出量变化波动尽可能小的要求, 将AUV输出量变化量也作为系统优化目标之一, 以达到减小AUV输出量超调和抑制跟踪波动的目的.

为此, 将广义预测控制的性能指标函数改进为

$$\begin{aligned}J=&\mathrm{E}\{\sum_{j=N_0}^{N_1}(y(k+j)-y_{\mathrm{r}}(k+j))^2+\\&\sum_{j=1}^{N_u}\lambda(j)(\Delta(u)(k+j-1))^2+\\&\sum_{j=N_0}^{N_u-1}\varphi(j)(y(k+j+1)-y(k+j))^2\}.\end{aligned}\tag{2}$$

式(2)中: $\mathrm{E}, N_0, N_1, N_u$ 和 $\lambda(j)$的定义见文献[6], $\varphi(j)$为抑制波动加权系数, $y(k+j)$为AUV未来输出量, $y_{\mathrm{r}}(k+j)$为AUV的参考输出量. 令$\lambda(j)$为常数λ, $N_0=1$, $\Delta(u)(k+j)=0$, $j=N_u, \cdots, N_1$, 表示N_u个节拍后控制量不再发生变化.

式(2)与传统的广义预测控制性能指标函数相比增加了第3项, 即抑制波动项, 令$\varphi(j)=\gamma(j)/T_{\mathrm{s}}^2$, 其中$T_{\mathrm{s}}$为采样周期. 令$\gamma(j)$为常数$\gamma$, 则式(2)中的第3项可写成为

$$\sum_{j=N_0}^{N_u-1}\gamma((y(k+j+1)-y(k+j))/T_{\mathrm{s}})^2.\tag{3}$$

对于AUV速度控制来说, $(y(k+j+1)-y(k+j))/T_{\mathrm{s}}$就是加速度, 通过控制性能指标函数最小化是对其加速度进行限制, 将起到抑制输出波动和减小超调的作用, 使输出能更平稳地跟踪目标值, 从而可以减少AUV的能量消耗, 本文称之为考虑加速度的广义预测控制算法.

采用CARIMA模型来描述受到干扰的被控对象, 通常采用如下离散差分方程来描述:

$$A(z^{-1})y(k)=B(z^{-1})u(k-1)+C(z^{-1})\xi(k)/\Delta.\tag{4}$$

其中: $A(z^{-1})$, $B(z^{-1})$和$C(z^{-1})$是后移算子z^{-1}的多项式, $u(k)$和$y(k)$分别表示被控对象的输入和输出, $\Delta=1-z^{-1}$表示差分算子, $\xi(k)$为不相关的随机变量序列, 令$C(z^{-1})=1$.

利用CARIMA模型预测AUV未来的状态, 忽略未来噪声的影响, 把模型预测值写成向量的形式

$$Y(k)=GU(k)+Fy(k)+H\Delta(u(k-1)).\tag{5}$$

其中$Y(k), U(k), F, H, E, G$的定义见文献[6]. 令

$$f=Fy(k)+H\Delta(u(k-1)),\tag{6}$$

则式(5)可写成

$$Y(k)=GU(k)+f.\tag{7}$$

定义

$$Y(k+1)=G_1U(k)+f_1,\tag{8}$$

$$Y(k+2)=G_2U(k)+f_2.\tag{9}$$

其中: G_1是G的$(N_1-1)\times N_u$的子矩阵, 由G的第i行到第$N_1-2+i, (i=1,2)$行组成, f_1是f的$(N_1-1)\times N_u$的子向量, 由f的第i行到第$N_1-2+i, (i=1,2)$组成. 根据以上定义可以将性能指标函数式(2)写成向量的形式

$$\begin{aligned}J=&\mathrm{E}\{[Y(k)-Y_{\mathrm{r}}(k)]^{\mathrm{T}}[Y(k)-Y_{\mathrm{r}}(k)]+\\&\lambda U^{\mathrm{T}}(k)U(k)+\varphi[Y(k+2)-\\&Y(k+1)]^{\mathrm{T}}[Y(k+2)-Y(k+1)]\}.\end{aligned}\tag{10}$$

其中

$$Y_{\mathrm{r}}(k)=[y_{\mathrm{r}}(k+N_0),\cdots,y_{\mathrm{r}}(k+N_1)]^{\mathrm{T}}.$$

将式(8)～(10)代入式(11), 对J求未来控制增量向量$U(k)$的导数, 并令其为零, 那么使J取最小值的控制律为

$$\begin{aligned}U(k)=&S^{-1}[G^{\mathrm{T}}(Y_{\mathrm{r}}-f)-G_2^{\mathrm{T}}(f_2-f_1)+\\&G_1^{\mathrm{T}}(f_2-f_1)\}.\end{aligned}\tag{11}$$

其中

$$\begin{aligned}S=&[G^{\mathrm{T}}G+\lambda I+(G_2^{\mathrm{T}}G_2-\\&G_2^{\mathrm{T}}G_1-G_1^{\mathrm{T}}G_2+G_1^{\mathrm{T}}G_1)\varphi].\end{aligned}$$

取$U(k)$的第1个元素, 则得此广义预测控制律为

$$\Delta u(k)=[1\ \ 0\ \ \cdots\ \ 0]U(k),\tag{12}$$

$$u(k)=u(k-1)+\Delta u(k).\tag{13}$$

3 水下机器人运动控制实验研究(AUV motion control experiments)

由于AUV为非线性系统, 可以通过实时辨识系统参数将其转化为时变线性系统, 使得非线性广义预测控制问题得到简化, 可以利用线性广义预测控制来解决非线性系统的控制问题. 为验证提出的减少能耗的广义预测控制算法的有效性, 以“海狸”AUV试验样机为实验对象, 进行了AUV艏向速度控制实验. 以0.2 rad/s 的方波信号为艏向目标速度, 分别利用传统的广义预测控制算法和考虑加速度的广义预测控制算法进行了AUV运动控制的研究, 采用HMR3000数字罗盘获取AUV的艏向信息, 对艏向信息进行差分, 利用Savitzky-Golay滤波器对艏向速度、加速度信息进行滤波. 对于广义预测控制

算法, 最大预测时域应接近系统上升时间, 对AUV施加阶跃信号, 测得上升时间大约4 s, 即20个控制节拍(“海狸”AUV的采样与控制和周期都是0.2 s), 取$N_1 = 20$. 控制加权序列λ先取较小值, 再增大直到达到满意的控制精度, 控制量也无剧烈变化为止, 最后取$\lambda = 0.1$, $1 \leqslant j \leqslant N_u$, 取$\varphi$为采样周期0.2.

1) AUV艏向速度广义预测控制实验结果如图1所示, 最大绝对误差为 0.37 rad/s, 均方差为0.043 rad/s, 能耗为$Q_{\rm gpc} = 1403.5$, 由于广义预测控制算法采用多步预测原则, 并且性能评价函数中引入了控制增量作为优化目标, 故广义预测控制的输出波动和控制量的变化都较为平缓.

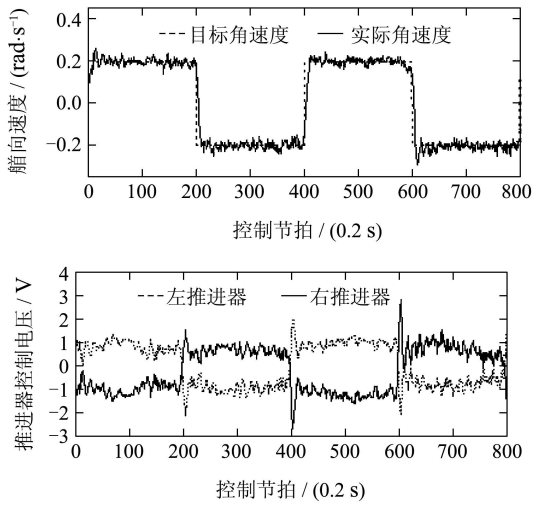

图 1 艏向速度广义预测控制

Fig. 1 Generalized predictive control of yaw velocity

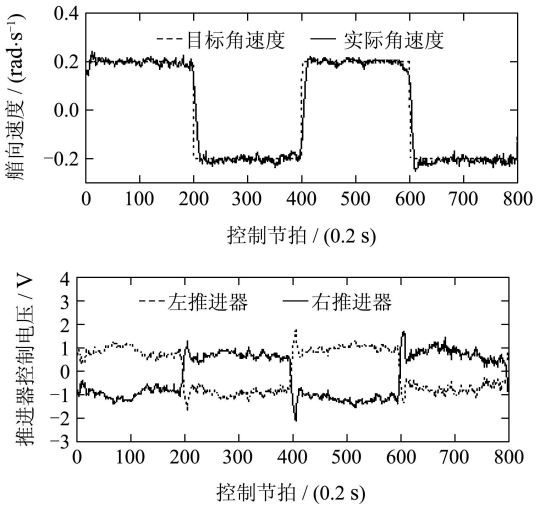

图 2 考虑加速度的艏向速度广义预测控制

Fig. 2 Generalized predictive control of yaw velocity with acceleration consideration

2) 考虑加速度的AUV艏向速度广义预测控制实验结果如图2所示, 其控制最大绝对误差为0.316 rad/s, 均方差为0.042 rad/s. 能量消耗为$Q_{\rm acc} = 1315.2$, 与没考虑加速度的广义预测控制的能耗与之相比为$Q_{\rm acc}/Q_{\rm gpc} = 1315.2/1403.5 = 0.937$. 由于将相邻两个采样时刻的输出量变化加入性能指标函数作为系统优化目标之一, 这种软约束方法能方便的起到抑制输出量超调和跟踪波动的作用, 比没有考虑加速度的广义预测控制算法效果好.

4 结论(Conclusion)

本文针对AUV的预测控制及能耗问题, 研究了有效地减小AUV速度的输出波动和超调的方法. 在广义预测控制算法性能指标函数基础上, 将输出量变化量加入传统评价函数中, 将其作为系统优化目标之一, 提出了考虑加速度的抑制波动广义预测控制算法. “海狸”AUV的水池实验结果验证了该算法对系统的输出波动和超调起到了一定的抑制作用, 同时也减小了AUV系统的能量消耗, 表明所提出的算法对于抑制AUV速度输出波动以及减少能量消耗的有效性. 虽然提出的算法在实验中取得了较好的结果, 但本文缺少算法的稳定性分析, 这将在以后进一步研究.

参考文献(References):

[1] 蒋新松，封锡盛，王棣堂. 水下机器人[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1999.
(JIANG Xinsong, FENG Xisheng, WANG Ditang. *Unmanned Underwater Vehicles*[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 1999.)

[2] NAEEM W. Model predictive control of an autonomous underwater vehicle[C] *//Proceedings of United Kingdom Automatic Control Council 2002 Postgraduate Symposim*. Sheffiled, UK: [s.n.], 2002: 19 – 23.

[3] ALOTAIWI A M. *Generalized predictive control of ship coupling motions using active flume tanks*[D]. Norfolk, USA: Old Dominion University, 2003.

[4] 张奇峰, 张艾群. 基于能源消耗最小的自治式水下机器人机械手系统协调运动研究[J]. 机器人, 2006, 28(4): 444 – 447,452.
(ZHANG Qifeng, ZHANG Aiqun. Coordinated motion of an autonomous underwater vehicle-manipulator system based on energy consumption minimization[J]. *Robot*, 2006, 28(4): 444 – 447,452.)

[5] 张铭钧, 韩金华, 李洪志. 基于神经网络的水下机器人航向角跟踪控制[J]. 哈尔滨工程大学学报, 1999, 20(6): 1 – 8.
(ZHANG Mingjun, HAN Jinhua, LI Hongzhi. The heading angle trail control of AUV based on neural network[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 1999, 20(6): 1 – 8.)

[6] 王伟. 广义预测控制理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

作者简介:

徐建安 (1977—), 男, 副教授, 研究方向为水下机器人智能控制技术, E-mail: xujianan@hrbeu.edu.cn;

任立国 (1983—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水下机器人广义预测控制技术, E-mail: renliguo@hrbeu.edu.cn;

杨立平 (1974—), 女, 讲师, 研究方向为水下机器人故障诊断与容错控制技术, E-mail: yangliping@hrbeu.edu.cn;

张铭钧 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为水下机器人技术, E-mail: zhangmingjun@hrbeu.edu.cn.