

力控和位置反馈型线控转向系统双向控制策略*

郑宏宇 王 祥 宗长富 陈国迎 何 磊

(吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130025)

摘要: 针对线控转向系统中角传动比和力传动比控制存在耦合的问题,在研究线控转向系统结构和动力学特点的基础上,综合传统遥操作机器人双向控制策略的优点,并分析其对于线控转向系统控制的适用性,提出了力控和位置差反馈型线控转向系统双向控制策略,设计了路感电动机和转向执行电动机闭环控制方法。通过实车试验验证了所设计的双向控制策略有效性。结果表明,提出的控制策略可以满足转向系统控制精度,从而保证整车的转向性能。

关键词: 线控转向 双向控制策略 力控-位置差反馈 实车试验

中图分类号: U463.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2014)06-0014-06

引言

线控转向(SBW)系统取消了转向盘到转向器之间的机械连接,转向系统角传动比和力传动比都可以自由设计,这为汽车设计带来广阔空间,也是未来转向系统的发展趋势^[1-6]。然而,虽然结构上转角和力传动比相互独立,但是在实际汽车转向中转角和力传动比之间存在耦合特性,这也为SBW系统闭环控制研究带来较大难度^[7-11]。因此,解决系统控制中转角和力矩耦合特性成为SBW系统的研究热点。

双向控制理论常用于遥操作机器人领域,可以实现机器人主控系统和被控系统之间运动和力信息之间的交互反馈控制^[12-13]。由于SBW系统结构与遥操作机器人系统有许多相似之处,因此部分国外学者开展了基于双向控制理论的SBW系统研究^[14-17]。

双向控制是通过对力和位置信息进行有效融合,实现对两者的解耦控制。此外,遥操作系统由于主控系统和被控系统之间距离较远,应用双向控制必须简化各种信息传递的复杂程度,才能解决系统远程信息传输的时延问题。SBW系统信息传输距离短,因此受时延的影响也较小。根据SBW系统结构和动力学性能特点,有针对性地研究汽车SBW系统双向控制方法很有必要。

本文针对SBW系统结构和动力学特点,提出一

种主-从双向控制结构。转向盘模块为主操控系统,转向执行模块为从操控系统,通过双向控制融合主和从系统之间的转角和力矩信息,保证转向系统控制精度,并通过实车试验对提出的控制策略进行验证。

1 SBW系统动力学模型

SBW系统模型包括转向盘模块、路感模拟电动机模块、转向执行电动机模块和转向执行模块。

转向盘模块的动力学模型为

$$F_h = J_h \ddot{\theta}_h + B_h \dot{\theta}_h + F_m$$
 (1)

$$F_m = K_h (\theta_h - \theta_m / r_m)$$
 (2)

- 式中 F_h ——驾驶员输入转向力
 J_h ——转向盘模块转动惯量
 θ_h ——转向盘转角 K_h ——扭杆刚度
 B_h ——转向盘模块阻尼
 F_m ——驾驶员转向反馈力
 θ_m ——路感电动机实际转角
 r_m ——转向器齿轮半径

路感模拟电动机模块包括电动机、蜗轮蜗杆减速器和电流传感器,其动力学模型为

$$T_m = J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m - F_m / r_m$$
 (3)

- 式中 T_m ——路感电动机输出力矩
 J_m ——路感电动机模块转动惯量
 B_m ——路感电动机模块阻尼系数

收稿日期: 2013-05-07 修回日期: 2013-06-24

* 国家自然科学基金资助项目(50115165)和国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA110904)

作者简介: 郑宏宇,讲师,博士后,主要从事汽车动力学仿真与控制研究,E-mail: zhenghy@jlu.edu.cn

通讯作者: 何磊,讲师,博士,主要从事汽车动力学仿真与控制研究,E-mail: jlu_helei@126.com

选择的路感电动机和转向执行电动机均采用永磁直流有刷电动机,路感电动机动力性模型为

$$T_m = K_m i_m \tag{4}$$

式中 K_m ——路感电动机转矩系数

i_m ——路感电动机实际电流

电动机控制主要采用电压调整法控制电流从而间接控制电动机转矩,电动机电路方程为

$$U_m = R_m i_m + L_m \frac{di_m}{dt} + K_m \dot{\theta}_m \tag{5}$$

式中 U_m ——路感电动机电枢电压

R_m ——路感电动机电枢电阻

L_m ——路感电动机电感

$\dot{\theta}_m$ ——路感电动机实际转速

转向执行电动机动力性模型为

$$T_M = J_M \ddot{\theta}_p + B_M \dot{\theta}_p + T_r/r_m \tag{6}$$

式中 T_M ——转向执行电动机输出力矩

J_M ——转向执行电动机模块转动惯量

θ_p ——转向器齿轮转角

B_M ——转向执行电动机模块阻尼系数

T_r ——转向执行电动机作用在齿条的力

与路感电动机相同,转向执行电动机的动力学和电路模型为

$$T_M = K_M i_M \tag{7}$$

$$U_M = R_M i_M + L_M \frac{di_M}{dt} + K_M \dot{\theta}_p \tag{8}$$

式中 K_M ——转向执行电动机转矩系数

i_M ——转向执行电动机实际电流

U_M ——转向执行电动机电枢电压

R_M ——转向执行电动机电枢电阻

L_M ——转向执行电动机电感

$\dot{\theta}_p$ ——转向执行电动机实际转速

转向执行模块主要包括齿轮齿条转向器和传感器等,其动力学方程为

$$T_t = J_p \ddot{\theta}_p + B_p \dot{\theta}_p + T_f \tag{9}$$

$$T_t = T_r + T_a \tag{10}$$

式中 T_t ——转向器总力矩

J_p ——转向执行模块转动惯量

B_p ——转向执行模块阻尼系数

T_f ——系统干摩擦力矩

T_a ——回正力矩作用在齿条上的力矩

2 典型双向控制结构

双向控制结构多应用于遥操作领域,主要针对危险或不利于操作者直接工作的特殊工作场所,通过机器人遥控技术代替操作者完成实际任务。操作

者通过通信系统传输信息和发送指令,实现对机器人的控制^[18-19]。图 1 为典型的双向控制框图。图中, F_o 为操作者目标力信息, F_m 为主操纵机构的力信息, X_m 为主操纵机构的位置信息, F_s 为从操纵机构的力信息, X_s 为从操纵机构的位置信息, F_e 为外界工作环境反馈的力信息。操作者发送指令控制主操纵机构,主操纵机构产生响应指令并通过通信环节控制从操纵机构实际完成操作者的指令;同时,从操纵机构工作过程中与环境的交互信息也通过通信环境反馈给操作者,使操作者可以身临其境地了解实际工作环境。

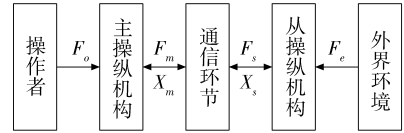


图 1 双向控制结构

Fig. 1 Bilateral control structure

由图 1 可知,典型的双向控制是通过力信息和位置信息交互,保证系统工作透明性和稳定性。其中,透明性是向操作者反馈有效的系统位置和力信息;稳定性是保证系统满足操作者工作要求^[20]。下面是几种典型的双向控制结构。

2.1 力反馈-位置差型双向控制结构

力反馈-位置差型控制结构如图 2 所示,主要是通过力传感器将从操纵机构的力信息直接反馈给主操纵机构,而操作者对从操纵机构进行位置差的闭环控制。这种结构的最大优点是向操作者准确反馈力信息,但是对于 SBW 系统,转向器总成的齿条力很难直接通过传感器测量,该结构也无法发挥 SBW 系统取消机械连接,可以阻止路面与轮胎产生的干扰力(不是有效路感信息)的特点,当 F_e 受到干扰时,会严重影响操作者的舒适性。此外,该结构不利于实现转向系统的回正控制。

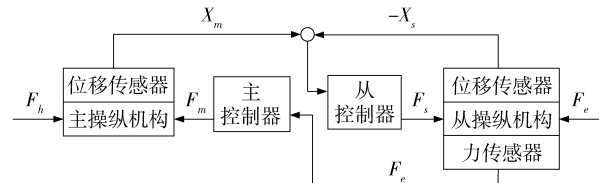


图 2 力反馈-位置差型双向控制结构

Fig. 2 Force feedback and position deviation

2.2 力差-位置差型双向控制结构

力差-位置差型控制结构与力反馈-位置差型结构的主要区别是 F_e 不直接反馈给操作者,而是将操作者输入力和环境反馈力做差,将差值作为力信息反馈给驾驶员,如图 3 所示。

力差-位置差型双向控制结构的优点是力控制

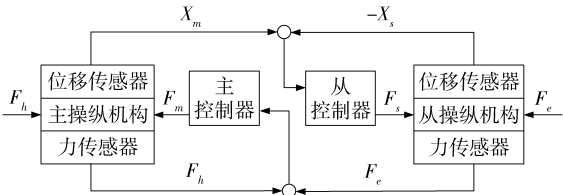


图3 力差-位置差型双向控制结构

Fig. 3 Force deviation and position deviation

为闭环,可以有效抑制 F_e 对系统的干扰,提高系统动态特性。但是,该结构很难直接应用于 SBW 系统,最主要原因是该结构产生的反馈力矩与真实路感差别较大,会让驾驶员有不适应感。此外,该结构也不利于转向系统的回正控制。

2.3 力-位置综合型双向控制结构

力-位置综合型与力差-位置差型结构相比,主要区别是在反馈力部分增加了位置差信息,这对于 SBW 系统而言,有利于转向系统的回正控制。但是,由于反馈力同时包含了力和位置信息,这为操作者提供有效的反馈力感造成了较大的难度,如图 4 所示。

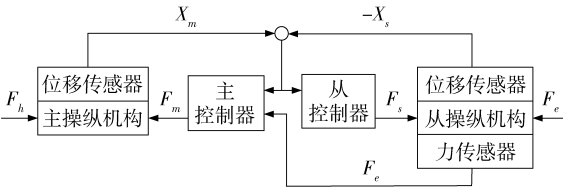


图4 力-位置综合型双向控制结构

Fig. 4 Comprehensive force and position

根据各典型双向控制结构的优缺点,结合 SBW 系统动力学特性、路感反馈、转向回正控制和角度跟随等工作特点,提出一种新型双向控制结构,如图 5 所示的力控-位置差反馈型双向控制结构。

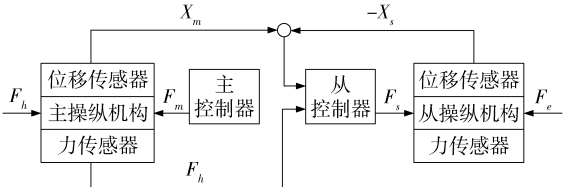


图5 力控-位置差反馈型双向控制结构

Fig. 5 Force and position deviation

SBW 系统的控制结构如图 6 所示。该结构主要根据驾驶员输入的转矩信号控制转向电动机,实现汽车转向控制;同时将小齿轮转角信号与方向盘转角的差值作为控制信号控制路感电动机,实现驾驶员路感反馈。这种结构最主要的优点是:①采用力矩信号驱动转向电动机,不需要转向执行模块中测量力信号的工作。②通过转角差值控制路感电动机,在保证路感反馈的基础上也兼顾了回正功能。

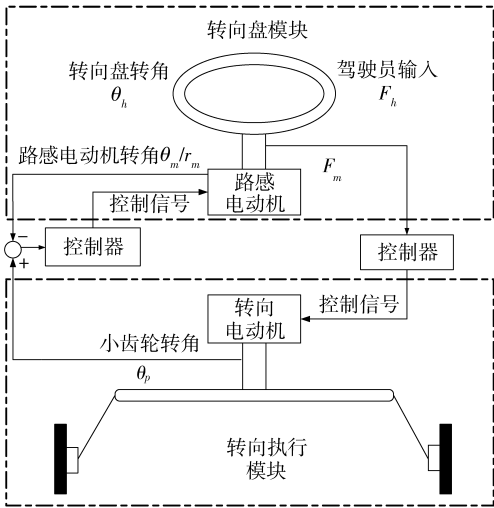


图6 线控转向控制结构图

Fig. 6 Steer-by-wire control structure

3 系统闭环控制

SBW 系统的执行机构主要是路感电动机和转向电动机。电动机控制的本质是对电动机的目标电流进行闭环控制,即控制实际电流值跟随目标电流值,最终通过输出脉宽调制信号控制电动机电压占空比实现电流闭环控制。由于被控系统动力学模型和电力学模型均可以获得,因此对于路感电动机和转向电动机均采用 PID 控制器。考虑到路感电动机和转向执行电动机分别是力矩控制和转角控制,因此采用的控制方法也有所差别。其中,路感电动机为力矩闭环控制,转向电动机为转角闭环控制,因此闭环控制方法中有所不同。

3.1 路感模拟电动机

路感模拟电动机输出转矩过程中,转矩波动会对驾驶员的路感产生重要影响。传统的电动机控制方法是采用电动机电流的单闭环控制方法,利用 SBW 系统的转角传感器信息,增加了转角闭环和转速闭环,从而提高电动机的动态响应和控制精度等。通过实车测试,如图 7 所示,最终电流控制器为 PID 控制,转速控制为 PI 控制器,位置控制为比例 P 控制。

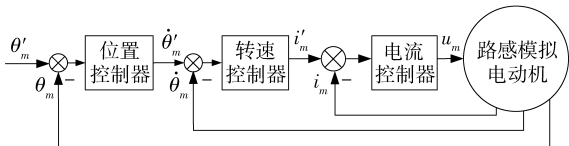


图7 路感电动机闭环控制结构

Fig. 7 Road feel motor control structure

图 7 中 θ'_m 为路感电动机目标转角, $\dot{\theta}'_m$ 为路感电动机目标转速, i'_m 为路感电动机目标电流。

3.2 试验验证

与路感电动机闭环控制相比,转向电动机采用

转角闭环控制,相对简单。通过实车测试最终采用电流 PID 控制即可满足控制要求,控制结构如图 8 所示。图中, i_M' 为转向电动机目标电流, u_M 为转向电动机控制信号。

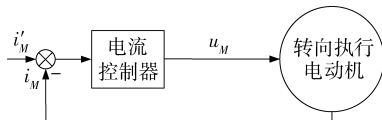


图 8 转向电动机闭环控制结构
Fig. 8 Steering motor control structure

4 实车试验验证

通过 SBW 系统试验样车,对设计的新型双向控制结构和电动机控制方法进行验证。该样车选用国内某款匹配有转向柱式 EPS 系统的 A 级车(图 9),保留该 EPS 系统作为路感模拟,并采用齿条式 EPS 系统替换原车的机械转向器控制车轮转向。采用转向盘阶跃和连续正弦试验对研究的控制策略进行验证。



图 9 试验车辆
Fig. 9 Experimental vehicle

4.1 转向盘角阶跃试验

试验车速取 50 km/h,侧向加速度稳态值在 3 m/s^2 左右,试验结果如图 10~12 所示。

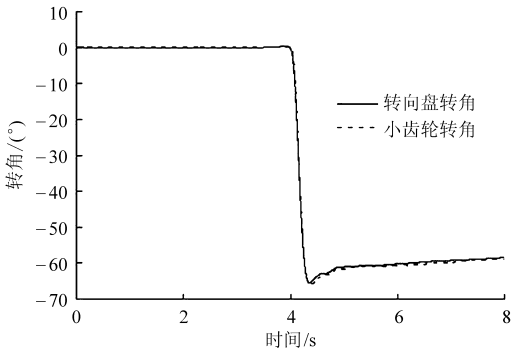


图 10 转向盘与小齿轮转角对比(阶跃试验)
Fig. 10 Compare steering wheel with pinion angle

传统转向系统中方向盘和转向器为机械连接,即方向盘转角永远等于转向器的小齿轮转角。SBW 系统转向控制同样需要保证小齿轮转角相对于方向盘转角不能有滞后现象。从图 10 中的试验结果表明,在控制策略作用下 SBW 系统的小齿轮转角跟随

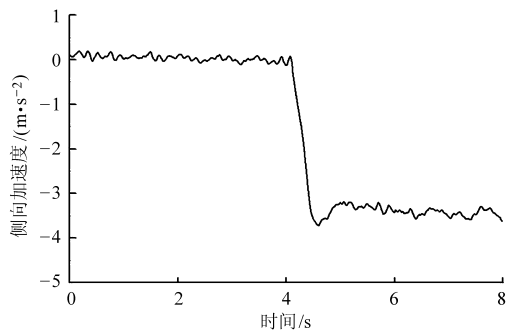


图 11 侧向加速度(阶跃试验)
Fig. 11 Lateral acceleration

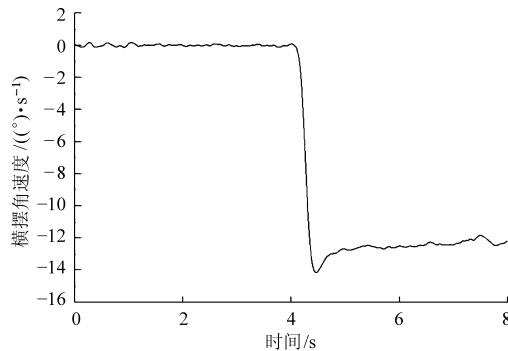


图 12 横摆角速度(阶跃试验)
Fig. 12 Yaw rate

转向盘转角效果较好,没有滞后现象发生,同时转向过程中的峰值侧向加速度和横摆角速度响应时间与传统汽车性能指标也基本近似,表明在阶跃瞬态转向工况下,SBW 系统可以保证车辆具有良好的状态响应,达到了预期的控制效果。

4.2 连续正弦试验

SBW 系统目前还不被法规允许产品化,同时 SBW 系统需要完善的故障诊断和容错控制系统才能进行高速试验,因此,考虑到实车试验安全性,试验车速为 50 km/h,驾驶员输入转向盘转角为连续正弦曲线。

从图 13~15 所示的连续正弦试验结果表明,在 SBW 系统作用下的汽车侧向加速度和横摆角速度均与传统转向汽车相似。同时,SBW 系统的小齿轮转角跟随转向盘转角效果较好,即使转向过程中转向盘转角处于峰值和方向变化时,也保证了较好的整车转角跟随精度。

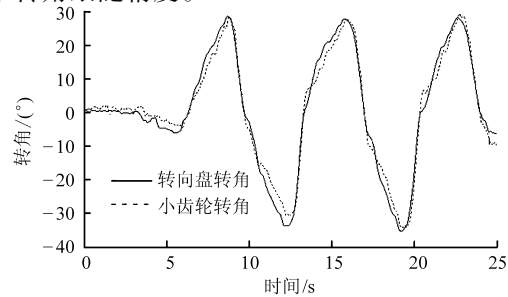


图 13 转向盘与小齿轮转角对比(正弦试验)
Fig. 13 Compare steering wheel with pinion angle

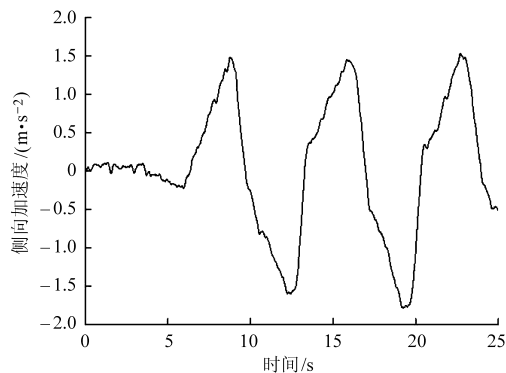


图14 侧向加速度(正弦试验)

Fig. 14 Lateral acceleration

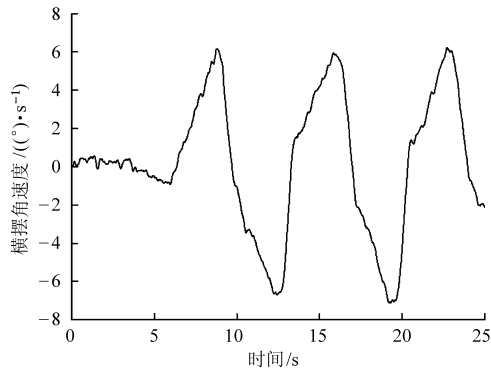


图15 横摆角速度(正弦试验)

Fig. 15 Yaw rate

5 结论

(1)根据SBW系统的结构特点,建立了系统动力学模型。分析了典型双向控制结构对于SBW系统的适用性,提出了一种新型的力控-位置差反馈型的SBW系统双向控制策略,并研究了路感电动机和

转向电动机的闭环控制方法。

(2)利用已有的SBW系统试验样车,进行典型操纵稳定性试验工况。试验结果表明,所设计的双向控制策略在保证汽车操纵性能的基础上,可以使小齿轮转角较好地跟随转向盘转角,保证了转向角跟随控制精度。

参 考 文 献

- 1 Yao Yixin. Vehicle steer-by-wire system control[C]. SAE Paper 2006-01-1175, 2006.
- 2 Yamaguchi Y, Murakami T. Adaptive control for virtual steering characteristics on electric vehicle using steer-by-wire system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(5): 1585-1594.
- 3 田承伟,宗长富,何磊,等. 汽车线控四轮转向控制策略[J]. 吉林大学学报:工学版, 2010, 40(5): 1177-1182.
- 4 Enache N M, Mammari S, Netto M, et al. Driver steering assistance for lane-departure avoidance based on hybrid automata and composite lyapunov function[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2010, 11(1): 28-39.
- 5 Koizumi R, Kurata F, Yamamoto M. Experimental study of lateral acceleration feedback control with steer-by-wire system[C]. SAE Paper 2010-01-0996, 2010.
- 6 Lam L T, Qian H H, Xu Y S. Omnidirectional steering interface and control for a four-wheel independent steering vehicle[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2010, 15(3): 329-338.
- 7 郑宏宇. 汽车线控转向路感模拟与主动转向控制策略研究[D]. 长春:吉林大学, 2009.
- 8 Zheng Hongyu. Research on road feeling and active steering control strategy for vehicle steer-by-wire system[D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
- 9 Kazemi R, Janbakhsh A A. Nonlinear adaptive sliding mode control for vehicle handling improvement via steer-by-wire[J]. International Journal of Automotive Technology, 2010, 11(3): 345-354.
- 10 郑宏宇,宗长富,王祥. 汽车线控转向系统路感模拟方法[J]. 农业机械学报, 2011, 42(2): 18-22.
- 11 Zheng Hongyu, Zong Changfu, Wang Xiang. Road feel design for vehicle steer-by-wire system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 18-22. (in Chinese)
- 12 Mehdizadeh E, Kabganian M, Kazemi R. A new force feedback for steer-by-wire vehicles via virtual vehicle concept[C] // 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, Orlando, USA, 2011: 2881-2886.
- 13 Sugita S, Tomizuka M. Cancellation of unnatural reaction torque in variable-gear-ratio steering system [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2012, 134(2): 10-19.
- 14 Kaneko K, Tokashiki H, Tanie K, et al. Impedance shaping based on force feedback bilateral control[C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation Albuquerque, New Mexico, 1997: 710-717.
- 15 Pan Yajun, Canudas-de-Wit C, Sename O. A new predictive approach for bilateral teleoperation with applications to drive-by-wire systems[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2006, 22(6): 1146-1162.
- 16 Odenthal D, Bunte T, Heitzer H D, et al. How to make steer-by-wire feel like power steering[C] // 15th Triennial Work Congress, 2002.
- 17 Im J S, Ozaki F, Matsushita T, et al. Experimental study on steer-by-wire system with bilateral control[C] // Proceedings of International Conference on Mechatronics, 2007: 1-6.
- 18 Matsunaga N, Im J, Kawaji S. Control of steering by wire system of electric vehicle using bilateral control designed by passivity approach[J]. Journal of System Design and Dynamics, 2010, 4(1): 50-60.
- 19 Nguyen B H, Ryu J W. Direct current measurement based steer-by-wire systems for realistic driving feeling[C] // IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2009: 1023-1028.

18 Tanaka H, Ohnishi K, Nishi H, et al. Implementation of bilateral control system based on acceleration control using FPGA for multi-DOF haptic endoscopic surgery robot[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 518 – 627.

19 文广. 双向液压伺服遥操作机器人的力觉临场感技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
Wen Guang. Research on force tele-presence technology of the bilateral hydraulic servo tele-robot [D]. Changchun: Jilin University, 2008. (in Chinese)

20 巩明德, 田博, 王辉. 基于双向伺服力反馈的电子节气门控制系统[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 1 – 7.
Gong Mingde, Tian Bo, Wang Hui. Electronic throttle control system based on bilateral servo with force feedback[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 1 – 7. (in Chinese)

Bilateral Control Strategy of Steer-by-wire System Using Force Control and Position Deviation Feedback

Zheng Hongyu Wang Xiang Zong Changfu Chen Guoying He Lei
(State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: Since the unnatural road feel reactive torque was created by the variable steering ratio of vehicle steer-by-wire (SBW) system, a dynamic model was established to analyze the structure and dynamic characteristic of SBW system. In order to eliminate the coupling of steering angle and road feel torque, a bilateral control method called steering torque deviation and angle feedback was proposed, which referred to tele-presence technology of teleoperation robot by bilateral control method. The closed loop control strategies were described to guarantee the rapid performance and stability of SBW system by road motor and steering actuator motor. The effectiveness was experimentally verified using an experimental car. The results showed that the control strategies enhanced the tracking accuracy of steering angle and improved the vehicle handling.

Key words: Steer-by-wire Bilateral control strategy Force control and position deviation feedback Vehicle test

(上接第 46 页)

3D Reconstruction of Agriculture and Forestry Crops

Liu Gang¹ Si Yongsheng² Feng Juan²
(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. College of Information Science and Technology, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China)

Abstract: 3D reconstruction of agriculture and forestry crops plays an important role in the studies on the biological characteristics of the crop, canopy light distribution and agricultural robot applications. Structures of crops are complex. Fast and accurate three-dimensional reconstruction of the crop is a challenging task. Crop 3D reconstruction methods have caused extensive concerns in the relevant field of study. This paper reviewed the methods of 3D reconstruction of agriculture and forestry crops. According to the technology and core device used, those methods are divided into four categories, rule-based method, image-based method, scan-based method and method based on 3D digitizer. According to this classification, the hardware of the various methods and applications in agriculture and forestry crop 3D reconstructions were summarized and described and the advantages and disadvantages of different methods were analyzed and compared. Finally, the development trend of the crop reconstruction was discussed.

Key words: Crop 3D reconstruction Review