

自動運転・隊列走行用操舵アクチュエータ*¹

Steering Actuator for Autonomous Driving and Platooning

石原 敦 A. ISHIHARA 九郎丸善和 Y. KUROMARU 仲 正美 M. NAKA

The New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) is running a “Development of Energy-saving ITS Technologies” project for the development of future technology meeting energy conservation needs. JTEKT have manufactured and supplied a steering actuator for the “R&D of autonomous driving and platooning” element of this project. This actuator is designed to allow the continued functioning of the auto-steering mechanism, even in the case that single-failure should occur on the ECU or motor. This paper describes the results of steering performance evaluations both with and without single-failure.

Key Words: steering system, automatic driving system, Energy ITS, platooning

1. はじめに

我が国で排出されるCO₂の約20%は自動車から排出されており、自動車交通における省エネルギー対策が重要な課題となっている。

独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) では2008年度から5年間で「エネルギーITS (高度道路交通システム) 推進事業」が計画されている。これによると、ITSの導入により不必要な加減速や渋滞などを少なくすることができ、燃料消費量を軽減できる。その一施策として、自動運転・隊列走行に関する研究開発プロジェクトが推進されている。本プロジェクトでは財団法人 日本自動車研究所 (以下、JARI) をはじめとする産官学の連携のもと、先端要素技術および実証用実験車を開発している。

これまでインフラを用いた自動運転・隊列走行を実施した例^{1), 2)}は多く見られる。その多くはデモンストレーション走行レベルに留まり実用化レベルには至っていない。本プロジェクトでは、カメラ情報を利用した画像処理、GPSなどを用いており、特別な道路インフラを必要としない。その目的は幹線物流の効率化と省エネルギー化の実用化を目指した隊列走行の技術開発である。

本報では、本プロジェクトの実証実験車用に製作・供給した自動操舵アクチュエータについて報告する。

2. システム概要

自動運転・隊列走行プロジェクトのシステム概要を図1に示す。車両制御コントローラはヨーレート、実車速などの情報を基に車両の速度、進行方向などを制御する。当社が設計・製作する操舵系システムにおいては、車両制御コントローラからの指示値に基づき操舵角を制御する。また、車両に生じたヨーレートなどが車両制御コントローラへフィードバックされる。

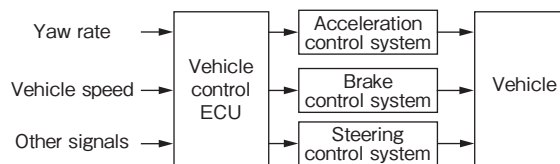


図1 自動運転システム概要
Outline of an autonomous driving system

本車両の自動操舵用ステアリングシステムを図2に示す。選定された実証実験車は、大きな前輪軸荷重によりタイヤ転舵に必要なトルクが大きい。したがって、本システムでは操舵角を制御する機能に加え、操舵トルクアシスト機構が必要となる。そこで、ベース車両に搭載されている油圧式パワーステアリングをそのまま使用し、操舵角制御用電動アクチュエータをコラム部に搭載した。

*1 本論文は、2009年自動車技術会 秋季大会前刷集 (20095573) を基に作成した。

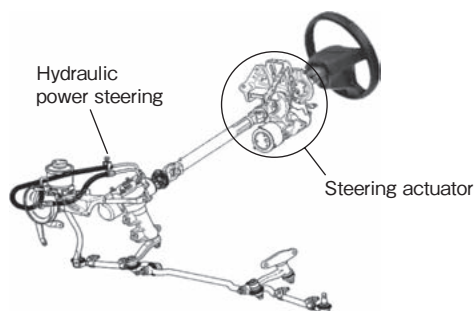


図2 ステアリングシステム外観
Steering system

3. アクチュエータの目標性能

本車両の自動操舵アクチュエータに求められる性能は次に述べる通りである。

(1)操舵性能

隊列走行時の横変位目標を達成するためには、操舵角制御応答や精度が重要である。自動操舵アクチュエータとしての応答性や分解能などの目標性能を表1に示す。数値目標の設定は、JARI 殿にご協力いただき、2005年に開催された日本国際博覧会（愛・地球博）の会場内輸送用自動運転隊列走行バスシステム³⁾における、操舵角指令値データを参考とした。

(2)耐故障性能

本プロジェクトの研究目的の一つとして、無人での走行あるいは手放しによる走行を想定した耐故障性能の検証がある。また、故障が発生した際にも車両として安全が確保されるように、冗長システムについて検討した。本報では開発した操舵系システム構成要素における単一故障時の操舵性能維持について、検討・検証した結果を述べる。

表1 アクチュエータ仕様
Actuator specifications

Steering angle resolution	0.1deg	
Max. steering torque	10N・m	
Rated steering angular speed	310deg/sec	
Max. steering angle	± 700deg	
Frequency response	Gain	0.9Min. (at 3Hz)
	Phase delay	45deg Max. (at 2Hz)
		90deg Max. (at 3Hz)
Step response	Angular speed	200deg/s Min.
	Dead time	20msec Max.
Ramp response	Delay time	80msec Max.
	MAX deviation	10deg

(3)運転者介入要件

自動運転中、危険回避などの目的のため、運転者による意図的な操舵介入（オーバライド）が想定される。この際、運転者操作を優先するために、自動操舵制御を停止させる必要がある。

4. システム設計概要

4.1 制御システム構成の概要

図3に制御システム構成の概要を示す。CAN 信号送受信線、電源供給線、モータ、ECU を2重系とした。また2系統の駆動方式は開発中のステアバイワイヤのフォールトトレラント⁴⁾にも採用されている常用冗長システムを用いた。1系統が待機状態となるバックアップ方式に比べ、故障判定までの故障状態の継続時間を最小限にできる。また、待機側への切替えがないため、無駄時間、応答遅れなく操舵角制御が継続できる。

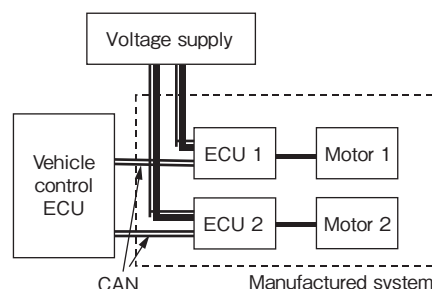


図3 冗長システム
Redundant system

4.2 機械要素

アクチュエータ外観を図4に示す。前述の2系統のモータは減速機構を介してステアリングシャフトに接続されている。主な機械要素の設計概要を以下に述べる。

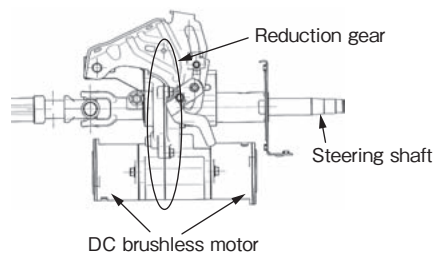


図4 アクチュエータ外観
Actuator appearance

減速機構：必要とされる減速比を限られた空間の中で実現するため、鋼製のはずば歯車から成る2段減速機構を採用した(図5)。本機構とモータのステアリングシャフト平行配置により、実証実験車のコラム周辺への改造搭載要件を満足した。また、はずば歯車の採用により摩擦を低減し、高い伝達効率、制御性能を目指した。さらに、鋼製歯車の安定した強度により、信頼性を高めた。

モータ：制御性能の高さおよびメンテナンス性を考慮し、同期型DCブラシレスモータを採用した。モータ内部には回転角検出センサとして耐久性・信頼性に優れるレゾルバを設置した。

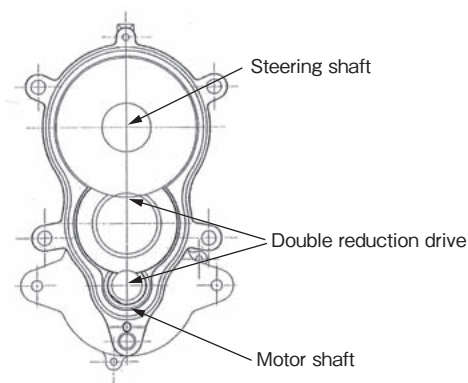


図5 減速機構
Reduction gear

5. アクチュエータ制御

5.1 操舵角制御

モータ/ECU 並列2重系システムの制御ブロック図を図6に示す。車両制御コントローラからの操舵角指令値 θ_1^* 、 θ_2^* は同一の値として2系統の独立したCANバスより、各ステアリングコントローラへ送信される。独立した2つのステアリングコントローラはそれぞれ操舵角指令値 θ_1^* 、 θ_2^* と実操舵角 θ_1 、 θ_2 との偏差に基

づき、モータ電流指示値 i_{m1}^* 、 i_{m2}^* を演算する。また、演算された電流指示値 i_{m1}^* 、 i_{m2}^* と実電流値 i_{m1} 、 i_{m2} との偏差に基づきモータをPWM制御する。なお、実操舵角 θ_1 、 θ_2 はモータ回転角と減速比 K_G より算出される。

5.2 フェールセーフ制御

今回の操舵系システム構成要素におけるフェールセーフについて述べる。2つのモータはそれぞれ独立したステアリングコントローラにより、常時5.1節のとおり駆動されている。各コントローラは個別に電源供給線、センサ信号線などの異常を電圧値や電流値を基に監視している。異常検出した際には、電源供給線、モータ線それぞれに設置されたリレーにより回路を遮断し機能を停止させる。これにより、単一故障時は他方のコントローラによって操舵機能が維持される。表2に主要な監視項目を示す。

表2 フェールセーフ仕様
Failsafe specifications

Element in failure	Failure modes
Power supply	Wiring harness shorting
	Wiring harness earthing
	Low and high voltage
Motor	Wiring harness shorting
	Wiring harness earthing
	FET shorting
Motor rotor Angle sensor	Wiring harness shorting
	Wiring harness earthing
CAN	Fault of bus line
Control unit	Sticking of relay contact
	Fault of micro processor
	RAM error

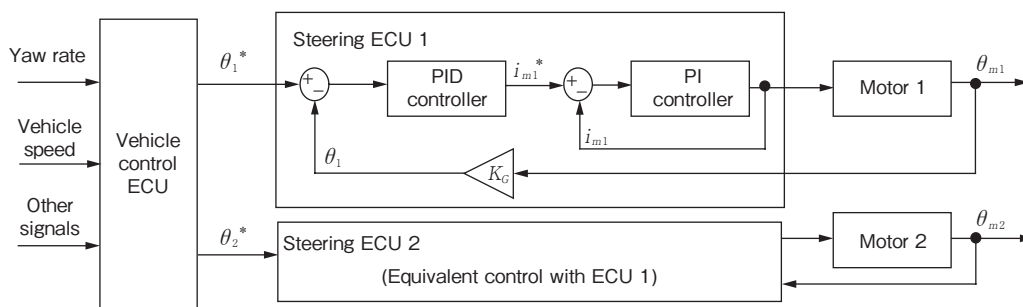


図6 制御ブロック図
Control block diagram

5.3 オーバライド制御

オーバライド時に、運転者操作を優先し、自動操舵制御を停止する機能を導入した。以下にオーバライドの判定手法を示す。

タイヤキングピン周りの運動方程式を(1)式に示す。

$$T_h + T_m + T_{assist} - T_{self} = I\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + K\theta \quad (1)$$

T_h , T_m , T_{assist} はそれぞれ運転者操舵、自動操舵アクチュエータ、パワーステアリングアシストによるトルクのキングピン周り換算値を示す。また、 T_{self} はセルフアライニングトルクを示す。ここで、運転者操舵介入によるモータトルクの変化について考察する。(1)式は(2)式のように表すことができる。

$$T_m + T_h = (I\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + K\theta) - (T_{assist} - T_{self}) \quad (2)$$

短時間の自動操舵制御時には、(2)式右辺は一定値とみなせる。したがって、オーバライド時には操舵トルクに応じて、モータトルク T_m が増減する。一方、自動操舵制御に必要なモータトルク最大値 T_{mMAX} は実車計測などにより求められる。モータトルク T_m の絶対値が T_{mMAX} より十分に大きい場合をオーバライドと判定する。これにより、トルクセンサなどの追加要素を必要とせず、オーバライドの判定を可能とした。

6. 実機性能試験

6.1 周波数特性

本アクチュエータを試験車両に搭載し、周波数特性を測定した。測定条件を表3に、結果を図7に示す。

各制御パラメータをチューニングした結果、表1に示した目標(3Hz時、位相遅れ90deg未満)を満足した。また、高速走行を想定すると、横風などによる強い外乱に対しても安定性の高いシステムが求められる。そこで、自動運転・隊列走行で想定されている車速0~80km/hで周波数特性を計測した。その結果、車速依存性のみられない良好な特性であることを確認した。

表3 周波数応答試験条件
Frequency response test conditions

Vehicle speed	10km/h
Input steering angle	± 5deg
Frequency	0 - 10Hz

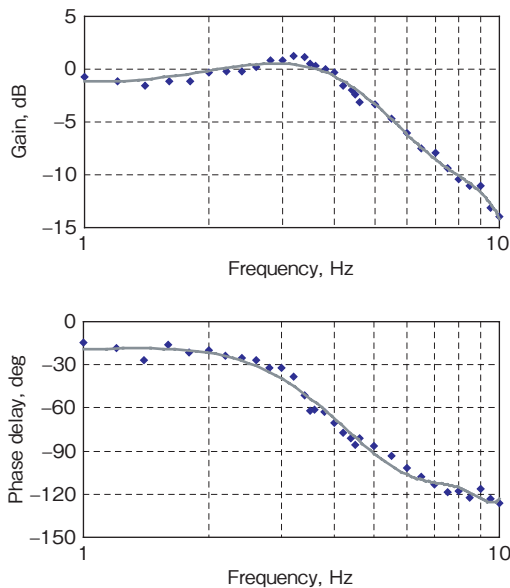


図7 周波数応答特性
Frequency response characteristics

6.2 単一故障時の操舵性能

ベンチ上で単一故障時の操舵性能を測定した。測定条件を表4に、結果を図8に示す。

表4 単一故障試験条件
Single-failure test condition

Input steering angle	Sine wave (± 30deg/1Hz)
Failure mode	Motor angle sensor harness shorting
Output load	5N·m (Powder brake)

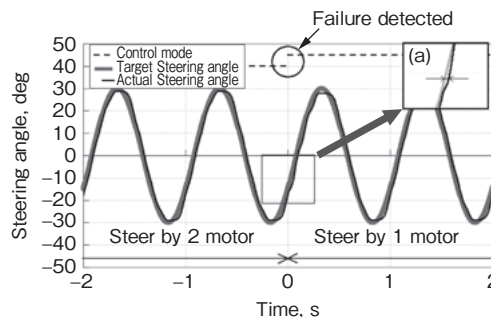


図8 単一故障時における操舵角応答
Steering angle response at single-failure occurrence

図8の破線は ECU 内部の制御モードであり、0 秒時において擬似的に故障判定信号を ECU 1 に与えたことを示している。故障判定以降、ECU 2 およびモータ 2 により操舵が継続されている。故障判定時、目標操舵角に対し実操舵角が若干変動していることが確認できる(図8(a))。ただし、常用冗長システムが有効に機能し、車両挙動に悪影響を与える変動量に達していない。また、故障判定前後の目標操舵角と実操舵角の偏差に大きな差異は見られず、操舵性能を維持できていることが分かる。

6.3 オーバライド判定

前述のオーバライド判定に基づき、運転者介入時に自動操舵が解除されることを確認した。紙面の都合上、詳細については割愛する。

7. おわりに

『エネルギー ITS』の主要プロジェクトである自動運転・隊列走行向け自動操舵アクチュエータを製作・供給した。

- (1)自動運転・隊列走行に必要とされる操舵性能目標に対し、電動パワーステアリングやステアバイワイヤでの開発ノウハウを活かして設計し、実機で性能を満足していることを確認した。
- (2)故障発生時の車両としての安全確保を考慮し、本アクチュエータをモータ/ECU 並列2重系システムとして構成した。単一故障時について、実機試験を実施し、操舵性能を維持できることを確認した。
- (3)自動運転中、運転者による意図的な操舵介入を判定し、自動操舵制御を停止する機能を導入した。これにより、危険回避などの目的のため、運転者操作を優先することが可能となる。

なお、本アクチュエータを搭載した実験車両は、隊列走行の実証実験において、所定の目標性能(側面区画白線との横偏差変動量)を満足することが確認されている。

8. 謝辞

本アクチュエータ製作にあたり、多大なるご協力を承りました財団法人 日本自動車研究所殿に対し、ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) S. Shladover: Path Report UCB-ITS-PRR2005-23 Demonstration of Automated Heavy-Duty Vehicles (2005).
- 2) 藤岡健彦, 馬場 純: 自動運転制御システムに関する研究 - Sliding Control と PID Control -, 自動車技術会論文集, vol. 28, no. 1(1997)101.
- 3) 青木啓二, 鈴木敏彦, 麻生 誠, 土井智之, 北崎知則: 自動運転バスによる次世代輸送システム, 第7回鉄道技術連合シンポジウム (J-Rail) 講演論文集, 44011(2000) 437.
- 4) 松原 健: ステアバイワイヤ技術とアクチュエータ, 日本能率協会 第24次モータ技術フォーラム(2006).

筆者



石原 敦*



九郎丸善和**



仲 正美***

A. ISHIHARA Y. KUROMARU M. NAKA

* 研究開発本部 研究開発センター
電子システム研究部

** ステアリング事業本部 システム開発部

*** 研究開発本部 研究開発センター FP 研究部