受動性に基づくバイラテラル制御を用いた 電気自動車のステアバイワイヤ制御*

任 宰 成^{*1}, 松 永 信 智^{*2}, 川 路 茂 保^{*3}

Control of Steering-by-Wire System of Electric Vehicle Using Bilateral Control Designed by Passivity Approach

Jae-Sung IM^{*4}, Nobutomo MATSUNAGA and Shigeyasu KAWAJI

^{*4} Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University,
2-39-1 Kurokami, Kumamoto-shi, Kumamoto, 860-8555 Japan

Steer-by-wire (SBW) system, in which the conventional mechanical linkages between the steering wheel and the front wheel are removed, is suited to active steering control, improving vehicle stability, dynamics and maneuverability. With conventional controller for SBW system, it is difficult for driver to feel reaction torque exactly from steering system. In this paper, a new SBW system using bilateral control designed by passivity approach is proposed. At first, conventional bilateral control scheme using disturbance observer is outlined. Secondly, a novel bilateral control with passivity is introduced. We also examine performance of the proposed control scheme and compare with conventional bilateral control scheme. The effectiveness of the proposed method is demonstrated by experiments with an electric vehicle.

Key Words: Steering-by-Wire (SBW), Bilateral Control, Passivity, Electric Vehicle

は じ め に

ステアバイワイヤ (SBW) システムは, ハンドルと前輪の間の機械的結合がなく, それぞれがモータなどのアクチュエータで駆動される. SBW システムは, 操舵者とタイヤの間の機械的干渉を除去できる点に特徴があり, ハンドルの操舵感やタイヤの操舵特性を調整できるだけでなく, ジョイスティックのような異なるデバイスによる操舵も可能である. また, SBW システムは車両の安定性や操舵性を動的に改善するアクティブステアリング制御にも適しており, 操舵者の操舵をアシストする自律操舵システムに応用されている⁽¹⁾⁽²⁾.

従来の SBW 制御においては, ハンドル用のモータと前輪駆動モータはそれぞれ個別の制御器が用いられており, 操舵者のハンドル角に応じてタイヤが操舵されている⁽³⁾⁽⁴⁾. この場合, ハンドル角に操舵角を追従させることが制御目的となっており, タイヤに接する路面や縁石, 轍などの路面状態の反力を操舵者にフィードバックすることが考慮されていない.

SBW システムの実用化においては, 操舵者のハン

ドル角にタイヤの操舵角を正確に追従させるだけでなく, 機械結合の操舵システムと同様にハンドルで路面反力を得ることが出来るコントローラの実現が重要となる. このような双方向の伝達特性を実現する手法として, バイラテラル型のマスタースレーブシステムが用いられてきた⁽⁵⁾. バイラテラル制御は目的に応じて様々な構造があり遠隔操作や手術支援等に応用されているが⁽⁶⁾, 車両の SBW 系の操舵制御への応用は少ない. 車両の操舵制御にバイラテラル制御を応用するにあたっては, 路面状態や操舵者の特性変動などのパラメータ変動に対するロバスト性が重要になる. しかし, 一般に路面状態や操舵者の特性変動は未知であり, モデル化も困難である. このような未知の特性変動に対する安定な制御系の設計手法として, 特定の系のエネルギー収支を観測しエネルギー消費を行なうことで安定性を保証する passivity observer(PO)/passivity controller(PC) と呼ばれるコントローラが提案されている⁽⁷⁾. この手法は, 設計方法が簡便で構造が簡単であることから, 車両制御系への応用の観点から適していると考えられる.

本論文は, SBW システムにおいて操舵者や路面環境の変化に対して, 制御系の安定性を保証しつつ操舵特性を改善することを目的に, 受動性を考慮した力帰還

* 原稿受付 2008年3月14日.

^{*1} 熊本大学大学院自然科学研究科(☎ 860-8555 熊本市黒髪2-39-1).

^{*2} 正員, 熊本大学大学院自然科学研究科.

^{*3} 正員, フェロー, 熊本大学大学院自然科学研究科.

E-mail: matunaga@cs.kumamoto-u.ac.jp

1. SBW システムのモデリング

1-1 ハンドル部のモデリング ハンドル部のモデルを図 1(a) に示す。ハンドルとモータはステアリングコラムで接続され、モータは操舵者に対して反力を生成する。操舵者の操舵トルクを τ_h 、モータトルクを τ_m 、操舵角を δ_h とする。 J_m と C_m をそれぞれ前輪操舵系の慣性と粘性とすると、ハンドル系の運動方程式は

$$J_m \ddot{\delta}_h + C_m \dot{\delta}_h = \tau_m + \tau_h \quad (1)$$

となる⁽⁸⁾。

1.2 前輪操舵部のモデリング 前輪操舵部はステアリングモータ、タイロッド、リンク機構から構成されており、その構造を図1(b)に示す。このとき、前輪操舵系の運動方程式は次式となる。

$$J_s \ddot{\delta}_s + C_s \dot{\delta}_s + \tau_f = \tau_s - \frac{1}{r_s} \tau_e \quad (2)$$

ここで、 δ_s は操舵モータ角、 J_s と C_s はそれぞれモータ軸まわりの慣性モーメントおよび粘性摩擦である。また、 τ_f 、 τ_r はそれぞれクローン摩擦および前輪操舵系のモータ出力であり、 r_s 、 r_p はモータのギヤ比およびラックアンドピニオンのギヤ比である。なお、 τ_e はラックにかかる等価外乱トルクである。

2. 外乱オブザーバを用いたバイラテラル制御系

2.1 外乱オブザーバ いま, $x_d = [\delta_s, \dot{\delta}_s]^T$, $u_d = [\tau_s, \tau_f]^T$ とすると, 前輪操舵部の状態空間表現は,

$$\begin{cases} \dot{x}_d = A_d x_d + B_{d1} u_d + B_{d2} \tau_e \\ y = [1, 0] x_d \end{cases} \quad (3)$$

Fig. 1 Schematic model of SBW system

$$:A_d = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{C_x}{J_x} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$:B_{d1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{J_s} & -\frac{1}{J_s} \end{bmatrix}, B_{d2} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J_s r_s} \end{bmatrix} \quad (5)$$

となる.

ここで, $z_d = [\delta_s, \dot{\delta}_s, \tau_e]^T$ とし, 拡大系を構成すると次式を得る.

$$\begin{cases} \dot{z}_d = F_d z_d + G_d u_d \\ y_d = C_d z_d = [1, 0, 0] z_d \end{cases} \quad (6)$$

$$: F_d = \begin{bmatrix} A_d & B_{2d} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, G_d = \begin{bmatrix} B_{d1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

外乱トルク τ_e を推定するために、拡大系を用いて外乱オブザーバ (DO) を構成すると、

$$\dot{\hat{z}}_d = (F_d - L_d C_d) \hat{z}_d + G_d u_d + L_d y_d \quad (8)$$

なる。ここで、 $\hat{z}_d$ は z_d の推定値であり、 L_d はオブザーバのゲインである。タイヤのアラインメントトルクや路面反力などの外乱トルク τ_e は、推定された外乱トルク $\hat{\tau}_e$ とモデル化誤差 τ_{int} を用いて次式で表される。

$$\tau_e = \hat{\tau}_e - \tau_{int} \quad (9)$$

前輪操舵部のパラメータが正確に同定できれば $\tau_{int} = 0$ となり、外乱オブザーバはタイヤからの外乱トルク τ_e の正確な推定が可能となる。図 2 に、外乱推定オブザーバのブロック図を示す⁽⁸⁾。

2.2 バイラテラル制御系の設計 SBW システム

はハンドル部と前輪操舵部から構成される。各部における制御目的は、ハンドル部においては操舵者の操作に伴う適切な反力を生成することで操舵特性を改善することであり、前輪操舵部においては、車両の操舵性と安定性を改善するために適切な操舵制御を行なう

Fig. 2 Block diagram of disturbance observer

ことにある。これらの制御目的を実現するために、本論文では双方向に運動や信号を伝達可能なマスタースレーブ制御系を用いて、SBW系の制御系を構成する。マスタースレーブの手法として様々な構造が提案されているが、本論文では、力・位置に任意のスケールゲインを有する力帰還型バイラテラル制御系を使用する⁽¹⁰⁾。

力のスケールゲインを γ 、変位のスケールゲインを σ とすると、異なるスケール間の力と位置の理想応答は次式で表される。

$$\begin{cases} \tau_h = \gamma \tau_e \\ \delta_s = \sigma r_s \delta_h \end{cases} \quad (10)$$

式(10)の理想特性を満たす力帰還型のバイラテラル制御系のブロック図を図3に示す。ここで、ハンドル部、前輪操舵部のモータ駆動トルクは次式で与えられる⁽⁵⁾。

$$\begin{cases} \tau_m = -\gamma \tau_e - k_f(\gamma \tau_e - \tau_h) \\ \tau_s = k_p(\sigma r_s \delta_h - \delta_s) - k_v s \delta_s + \tau_f \end{cases} \quad (11)$$

なお、 k_p 、 k_v はスレーブ側の位置コントローラのゲインであり、マスターからの指令に基づくスレーブ側の追従性能の調整に用いられる。他方、 k_f は、スレーブからの反力を制御する力コントローラのゲインである。

タイヤからの反力 F_e は、ラックにかかる等価外乱トルク τ_e とラックアンドピニオンのギヤ比 r_p を用いて次式で表される。

$$F_e = \tau_e r_p \quad (12)$$

また、操舵モータ角 δ_s とラック変位 x_e は、モータおよびラックアンドピニオンのギヤ比 r_s 、 r_p を用いて

$$x_e = \frac{r_p}{r_s} \delta_s \quad (13)$$

Fig. 3 Schematic diagram of bilateral control with force feedback

となる。タイヤからの反力 F_e はラック変位 x_e に応じて発生し、環境のインピーダンスを Z_e とすると

$$F_e = Z_e(s)x_e \quad (14)$$

と表される。したがって、操舵者で検知される操舵インピーダンス $G_h(s)$ は次式で求まる。

$$\begin{aligned} G_h(s) &= \frac{\delta_h}{\tau_h} \\ &= \frac{A(s)}{p(s)A(s) + \gamma \sigma k_p Z_e(s)} \\ &: A(s) = J_s s^2 + (C_s + k_v)s + k_p + \left(\frac{1}{r_s}\right)^2 Z_e(s) \\ &: p(s) = \frac{J_m s^2 + C_m s}{1 + k_f} \end{aligned} \quad (15)$$

車両の操舵制御において、操舵者の操舵角指令に対するタイヤの操舵角の追従性能が重要である。なお、ゆっくりした操舵の場合は、車両の粘性、慣性パラメータに対して k_p を大きくすることで、式(15)は次式となる。

$$G_h(s) \approx \frac{1}{\gamma \sigma Z_e(s)} \quad (16)$$

つまり、操舵者は環境インピーダンス $Z_e(s)$ を力のスケールゲイン γ と変位のスケールゲイン σ の積として認識することになる。

3. 受動性に基づくバイラテラル制御系の設計

図4にSBWシステムのブロック図を示す。SBWシステムは、人間（操舵者）、マスタ（ハンドル部）、コ

ントローラ、スレーブ（前輪操舵部）、環境（路面反力など）の5つのブロックから構成される。

一般に、環境は受動的であり Hogan らは操舵者が受動的な回路網でモデル化できることを実験的に示した⁽¹¹⁾。操舵者と環境が受動性を満たすので、SBW 系の安定性を満たすためには図中の点線枠で記述される2端子対回路を受動的とすればよい。

Fig. 4 Network model of a SBW system

いま、操作トルク $\tau(\omega)$ および速度ベクトル $v(\omega)$ に対して

$$\int_0^t \tau^T(\omega)v(\omega)d\omega + E(0) \geq 0 \quad (\forall t \geq 0) \quad (17)$$

が成り立てば SBW システムは受動的となる⁽⁷⁾。なお、 $E(0)$ は初期値のみに依存する非負の定数である。

そこで、マスタースレーブ系の安定性を評価するために、次のエネルギー量を考える。

$$E_{obs}(n) = \Delta T \sum_{k=0}^n \tau(k)^T v(k) \quad (18)$$

ここで、 ΔT はサンプリング時間であり、操舵者や環境のダイナミクスに比べ十分速く設定する。

式(18)は、ある時刻 n のエネルギー量 $E_{obs}(n)$ を計測する“passivity observer”(PO)となる。また、要求されるエネルギー総量にエネルギーを消散させるためには消散要素を設計し配置することで系を安定にすることができるが、これを“passivity controller”(PC)と呼ぶ⁽⁷⁾。PC は、ダンパのような機械受動素子によるエネルギー消散を電子的に実現するコントローラと見なすことができ、マスター（ハンドル部）に対する PC を図5に示す。

Fig. 5 Passive control for one-port network

図に示す2端子回路において、文献(7)の手法を用いて PC を構成する。

step1 2端子回路の入力を $v_m(k)$ とし、 $\tau_m(k)$ を計測する。

step2 系の因果性に基づき、次の漸化式で PO を構成する。

$$E_{obs}(n) = E_{obs}(n-1) + [\tau_m(n)v_m(n) + \alpha(n-1)v_m(n-1)^2]\Delta T \quad (19)$$

step3 $E_{obs}(n)$ を用いて $\alpha(n)$ を求める。

$$\alpha(n) = \begin{cases} -\frac{E_{obs}(n)}{\Delta T v_m(n)^2} & \text{if } E_{obs}(n) < 0 \\ 0 & \text{if } E_{obs}(n) \geq 0 \end{cases} \quad (20)$$

step4 PC の出力を求める。

$$\tau'_m(n) = \tau_m(n) + \alpha(n)v_m(n) \quad (21)$$

このように構成した PC を用いたシステムの実動性を調べると、式(19)より

$$E_{obs}(n) = \Delta T \left[\sum_{k=0}^n \tau_m(k)v_m(k) + \sum_{k=0}^{n-1} \alpha(k)v_m(k)^2 \right] \quad (22)$$

また、式(21)を用いると

$$\begin{aligned} \Delta T \sum_{k=0}^n \tau'_m(k)v_m(k) &= \Delta T \left[\sum_{k=0}^n \tau_m(k)v_m(k) + \sum_{k=0}^n \alpha(k)v_m(k)^2 \right] \\ &= E_{obs}(n) + \alpha(n)v_m(n)^2 \Delta T \end{aligned} \quad (23)$$

となり、式(20)で決定される $\alpha(n)$ を用いると

$$\Delta T \sum_{k=0}^n \tau'_m(k)v_m(k) \geq 0 \quad (\forall t \geq 0) \quad (24)$$

すなわち、システムは受動的となる。

なお、PC はマスター側、スレーブ側にそれぞれ設計することができ、図6に PC を用いたバイラテラル制御系の構成を示す。

4. SBW の実験結果

4.1 実験装置の構成

図7に SBW システムの実験車両を示す。実験車両は小型電気自動車 COMS（トヨタ車体 AK10E-PC）に SBW ユニートを搭載している。搭載した SBW システムは、軽自動車用のコラムアシスト型のパワーステアリング装置（EPS）を利用し、ステアリングシャフトに結合せず EPS 用モータで操舵者に対する反力生成を行なっている。前輪を操舵するために、DC サーボモータ（山洋電機 300W）によりピニオンギアを直接動作させ、その角度信号はモータのエンコーダ（1000PPR）により計測する。ハンドルには、操舵力角計（共和電業 SFA-A-1003S）を装着しハンドルに加わる力と位置信号をひずみアンプ（DSA-606）に

Fig. 6 Block diagram of the bilateral control with passive approach

Fig. 8 Block diagram of control system

Fig. 7 Experimental vehicle with SBW system

より直接計測する。また、操舵部のラック変位はレーザ変位計 (オムロン ZX-LD-100) にて計測する。これらの信号はエンコーダカウンタ、AD コンバータによ

り CPU ボードに取り込まれる。提案するコントローラはワンボードマイコン (SH4) 上の RT-LINUX 上で動作し、サンプリング間隔 20[ms] で実時間制御される。図 8 に制御システムの構成を示す。

4.2 操舵実験 実験において、式 (11) におけるスケーリング比を $\gamma=1.0$, $\sigma=1.0$ とした力帰還型バイラテラル制御系を実装し、ハンドルから操舵者が操舵を行なった。

なお、実験ではハンドルと前輪が機械結合されている場合の特性を模擬するようにバイラテラル制御のゲインを調整している。実験で使用する電気自動車の同定したパラメータを表 1 を示す。オブザーバのゲインを $L_d = [59.9, 1.19 \times 10^3, -2.20]^T$ とし、バイラテラル制御系のパラメータを $\{k_p, k_v, k_f\} = \{0.80, 1.9 \times 10^{-2}, 0.25\}$ と調整して実験を行なった。

Table 1 Parameters of electric car

Handle system	Steering system t
$J_m = 8.78 \times 10^{-2} [\text{Nm/rad/s}^2]$	$J_s = 2.70 \times 10^{-4} [\text{Nm/rad/s}^2]$
$C_m = 3.68 \times 10^{-1} [\text{Nm/rad/s}]$	$C_s = 3.70 \times 10^{-5} [\text{Nm/rad/s}]$
$r_s = 15$	$r_p = 0.005 [\text{rad/m}]$

まず、基本性能の確認のために車体をジャッキアッ

ブしてタイヤに路面外力が加わらない状態で、提案手法を用いた場合のハンドル角 δ_h とピニオン角 $r_s \delta_s$ の追従結果を図9に示す。実験では、運転者が $\pm 90[\text{deg}]$ の振幅で、 $0.2[\text{Hz}]$ 程度のゆっくりとした操舵を行なっている。この場合、ハンドル角とピニオン角がほぼ一致しており良好な追従が実現できていることがわかる。なお、ジャッキアップにより環境の反力が非常に小さい場合でも安定性が確保されていることに注意する。

次に、車両が約 $15[\text{km/h}]$ で走行した後に、時刻 $15[\text{s}]$ でハンドルを少し右に操舵した後、大きく左に操舵した場合のハンドル角 δ_h に対するピニオン角 $r_s \delta_s$ の追従、および外乱オブザーバの推定値 $\hat{e}$ と操舵トルク τ_h の関係を図10に示す。同図(a)に示す走行状態においてもハンドル角とピニオン角はほぼ一致している。また同図(b)には、ハンドルトルク τ_h および外乱オブザーバにより求めた $\gamma \tau_e$ を比較している。図より、走行状態において式(10)に示す理想的な操舵角追従および路面反力の伝達特性が実現できていることがわかる。

また、本論文で示すPCの効果を示すために図10の運転条件での $\alpha(n)$ の変化を図11に示す。図において、マスタ側・スレーブ側両方の $\alpha(n)$ は操舵方向が切り替わる際に大きくなる。特に右から左に大きく操舵する約 $t = 15 \sim 17[\text{s}]$ で、操舵側・環境側両方の $\alpha(n)$ は大きくなる。なお、PCを使わない場合の実験では、操舵の状況によってハンドルに振動が出るなどの支障があった。安定な操舵システムの実現のためには路面や操舵を考慮したロバストな制御系の設計が不可欠である。

さらに、力のスケーリングゲイン γ を変化させた場合のハンドルの反力を図12に示す。実験では、車両速度 $0[\text{km}]$ で路面とタイヤが接触した状態での操舵（据えぎり）で操舵を行なった場合のハンドルに発生する反力である。なお、前輪操舵部の反力は外乱オブザーバで推定している。図より、 γ を小さくすることで、ハンドルへの反力が調整できていることがわかる。

最後に、操舵者の操舵感の評価で用いられる操舵者の操舵トルクと操舵角のリサージュ波形⁽¹³⁾を図13に示す。実験では、同様に据えぎりでの評価を行なっている。本実験では、SBWにより機械結合を模擬した特性を再現していることから、SBWの特性が剛体軸による機械結合特性にできるだけ一致することが好ましい。図では、SBWのトルクに外乱オブザーバによる若干のノイズが見られるものの、SBW制御により、機械結合相当の双方向の伝達特性が実現できていることがわかる。また他の走行条件でもテスト操舵者による評価実験により有効性を検証した。

Fig. 9 Proposed control result of the steering command and pinion angle (no tire-to-ground contact)

(a) steering command and pinion angle

(b) Reaction force and estimated disturbance by DO

Fig. 10 Control result of SBW system with $15[\text{km/h}]$ driving

おわりに

本研究では、SBWシステムにおいて操舵者や路面環境の変化に対して、制御系の安定性を保証し操舵特

(a) $\alpha(n)$ in master controller (operator side) (b) $\alpha(n)$ in slave controller (environment side)Fig. 11 Response of $\alpha(n)$ with 15[km/h] driving

性を改善することを目的に、受動性を考慮した力帰還型のバイラテラル制御系を提案した。まず、対象とする SBW システムに対して、外乱オブザーバを用いた力帰還型バイラテラル制御系を構成し、受動性の概念に基づきその安定性を保証する条件を求め、PO/PC を用いて、安定な力帰還型バイラテラル制御系を設計した。提案する制御手法を小型電気自動車に実装し、操舵・走行実験を行い提案する手法の有効性を示した。

本論文では、紙面の制限により一部の実験しか掲載していないが、評価ドライバによる砂利道走行、アスファルトでのスラローム走行などの実験を行い良好な操舵性とロバスト性が実現できていることを確認している。なお、バイラテラル制御系のパラメータ調整により安定な制御系を構成することができるが、大きな変動を考慮すると操舵特性が劣化する。本手法は、ノミナルな状況で制御系をあらかじめ設計し、PO/PC により環境の変化による受動性の劣化を逐次測定し補償することで、急激な操舵や環境変化時に動作し安定な制御系を構成する点に特徴がある。

SBW の実用化においては、複雑な感性仕様に対す

(a) $\gamma = 0.5$ (b) $\gamma = 1$ Fig. 12 Comparison of reaction force changing γ (steer without driving)

Fig. 13 Lissajous figure of proposed system (steer without driving)

る調整、さらなる安全性・安定性・信頼性の向上などが求められる。また、実験においてはアスファルト路面での基本的な走行・操舵を行なっているが、今後、

舵者や環境の状況に応じたコントローラの設計や、操舵者の動特性を考慮した操舵特性の検討を行ないたい。

文 献

- (1) Segawa.M, Kimura.S, Kada.T and Nakano.S, “A Study on the Relationship between vehicle behavior and steering wheel torque on steer by wire vehicle”, *Vehicle System Dynamics*, Vol.41 (2004), pp.202-211.
- (2) Shino.M, Raksincharoensak.P, Watanabe.S, and Nagai.M, “Vehicle handling and stability control of microscale electric vehicle utilizing steer-by-wire system”, *Proceedings of the 7th International Symposium on Advanced Vehicle Control* (2004), pp.797-802.
- (3) Hayama.R, and Nishizaki.K, “The vehicle stability control responsibility improvement using steer-by-wire”, *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium* (2000), pp.596-601.
- (4) Amberkar.S, D’Ambrosio.J.G and Murray.B.T, “A system-safety process for by-wire automotive systems”, *SAE International Congress*, 2000-07-0815 (2000).
- (5) Kobayashi.H et al., “Practical Control of Robot Manipulators”, *Corona Publishing* (1997)
- (6) Yabumoto.H, Nakazawa.K, Morikawa.Y and Kitajima.M, “Bilateral Control without Force Sensor for Surgical Assist Robot (Mechanical System)”, *Transaction of JSME*, Vol.73-C (2007), pp.778-783.
- (7) Hannaford.B and Ryu.J.H, “Time Domain Passivity Control of Haptic Interfaces”, *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seoul* (2001), pp.1863-1869.
- (8) Im.J, Ozaki.F, Matsunaga.N and Kawaji.S, “Design of Steer-by-Wire System with Bilateral Control Method Using Disturbance Observer”, *Proceedings of IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Zurich* (2007), pp.1-6.
- (9) Kaneko.K, Tokashike.H, Tanie.K and Komoriya.K, “Impedance Shaping based on Force Feedback Bilateral Control in Macro-Micro Teleoperation System”, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol.1 (1997), pp.710-717.
- (10) Yokokohji.Y and Yoshikawa.T, “Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinesthetic coupling-formulation and experiment”, *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol.10, No.5 (1994), pp.605-620.
- (11) Hogan.N, “Controlling impedance at the man/ machine”, *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, Scottsdale, AZ*, Vol.10 (1989), pp.1626-1631.
- (12) Hada.M, Yamada.D, Miura.H and Tsuji.T, “An Equivalent Characteristics Analysis System for Human-machine System”, *Transaction of SICE*, Vol.42, No.9 (2006), pp.1083-1091.
- (13) ISO13674-1, “Road vehicles-Test method for the quantification of on-center handling- Part1: Wave test” (2003)