C-022

ブレーキシステムのモデルベース診断
Model-based diagnosis for braking systems

平塚 聡 *　　石川 恭雅 †　　房岡 璋 *
Satoshi Hiratsuka　　Yasumasa Ishikawa　　Akira Fusaoka

1. はじめに

近年，自動車などの制御システムに対する精緻なリアルタイム診断システムが求められている．本論文では自動車のブレーキラインの dynamics を微分方程式によるモデルに変換し，このモデルにおける故障の伝搬関係を sign algebra の制約式として表し，これを Boole 代数の論理式に変換するメカニカルな手続きにより診断を行う方法を提案する．

2. ブレーキライン

自動車のフットブレーキにおけるブレーキラインの概念図を図 1 に示す．
フットペダルを踏み込むとその力はブレーキブースター

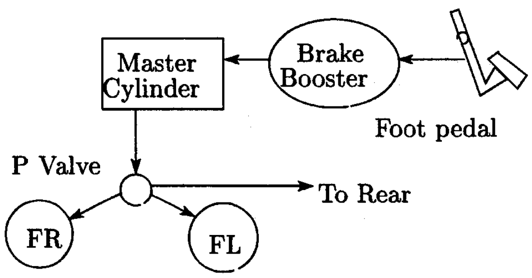

図 1: ブレーキライン

（倍力装置）に送られる．そこからの出力はマスターシリンダーで油圧に変えられ，P バルブに伝わり，ここで力の調節が行われ，各タイヤへブレーキ力として伝えられる．

3. モデル抽象化

3.1 変位モデル

構造上の観点から，2 つのシチュエーションに分けて診断を行う．ひとつは，ブレーキペダルを踏み込んだ力を，数倍の圧力に変換するブレーキブースターの出力値を観測し，故障診断を行うシチュエーションである．もうひとつはブレーキブースターの出力を元に実際にブレーキとして与えられる圧力から診断を行うものである．前者を situation1，後者を situation2 として考える．

3.2 Situation1 の変位モデル

situation1 での dynamics は以下のように表される．

$$q = ka \tag{1}$$

ここで，a はブレーキペダルからの出力値，q はブレーキブースターの出力値，k は倍力定数である．q，a は観測可能である．変数 X の参照値を X_r とすると

$$\begin{aligned} q - q_r &= k_r a_r \\ q - q_r &= Ka - K_r a + k_r a - k_r a_r \\ \Delta q &= \Delta k a + k_r \Delta a \end{aligned} \tag{2}$$

3.3 Situation2 の変位モデル

situation2 での dynamics は以下のようになる [1]．

$$\dot{p}(t) = \frac{G}{\tau} q(t-T) - \frac{p}{\tau}(t) \tag{3}$$

ここで，p はブレーキ油圧，G はバルブ効果などの静的増加，τ はタイムコンスタント，T は時間遅れである．q，p，$\dot{p}$ は観測可能である．この式を変換し

$$\dot{p}(t) + Ap(t) = Bq(t-T) \tag{4}$$

$$\text{where} \quad A = \frac{1}{\tau}, B = \frac{G}{\tau}$$

となる．この式は参照値でも成り立つので，

$$\dot{p}_r(t) + A_r p_r(t) = B_r q_r(t-T) \tag{5}$$

変位モデルを求めるために，式 (4) と式 (5) の差を取る．

$$\begin{aligned} \dot{p}(t) + Ap(t) - (\dot{p}_r(t) + A_r p_r(t)) &= Bq(t-T) - B_r q_r(t-T) \\ \Delta\dot{p}(t) + \Delta A p(t) + A_r \Delta p(t) &= \Delta B q(t-T) + B_r \Delta q(t-T) \end{aligned} \tag{6}$$

4. 定性変位モデル

4.1 Sign algebra による離散化

定性モデルを得るための離散化の手段として，sign algebra を用いる．sign algebra は，Williams によって導入された代数的定性モデルを構成するための代数系である [3]．実数の値域 $(-\infty, +\infty)$ を 4 つの領域 $0 = \{0\}, + = (0, \infty), - = (-\infty, 0), ? = (-\infty, +\infty)$ に分割し，これらを定性値とすることにより構成される．実数 x の定性値を $[x]$ で表す．さらに，この定性値を取る変数間に演算 (sign operator)$\oplus, \otimes, \ominus, \oslash$ を導入する（表 1）．ブレーキラインにおいての定性変位モデルも，式 (2),(5) を sign algebra 上において離散化することで得られる．

$$[\Delta q] = [\Delta k] \otimes [a] \oplus [k_r] \otimes [\Delta a] \tag{7}$$

$$\begin{aligned} &[\Delta\dot{p}(t)] \oplus [\Delta A] \otimes [p(t)] \oplus [A_r] \otimes [\Delta p(t)] \\ = \; &[\Delta B] \otimes [q(t-T)] \oplus [B_r] \otimes [\Delta q(t-T)] \end{aligned} \tag{8}$$

$[A_r]$，$[B_r]$，k_r は参照値であるので，常に正の数である．よって，式 (7)，(8) は簡単化でき，それぞれ，

$$[\Delta q] = [\Delta k] \otimes [a] \oplus [\Delta a] \tag{9}$$

$$[\dot{p}(t)] \oplus [A] \otimes [p(t)] = [B] \otimes [q(t-T)] \tag{10}$$

$$\begin{aligned} &[\Delta\dot{p}(t)] \oplus [\Delta A] \otimes [p(t)] \oplus [\Delta p(t)] \\ &= [\Delta B] \otimes [q(t-T)] \oplus [\Delta q(t-T)] \end{aligned} \tag{11}$$

となる．このモデルにおける故障のケースは，

*立命館大学情報理工学部知能情報学科
†株式会社デンソー

表 1: sign algebra 真理値表

$\oplus$	$-$	0	$+$	?
$-$	$-$	$-$	?	?
0	$-$	0	$+$	?
$+$	?	$+$	$+$	?
?	?	?	?	?

$\otimes$	$-$	0	$+$	?
$-$	$+$	0	$-$	?
0	0	0	0	0
$+$	$-$	0	$+$	?
?	?	0	?	?

$\ominus$	$-$	0	$+$	?
$-$	?	$-$	$-$	?
0	$+$	0	$-$	?
$+$	$+$	$+$	?	?
?	?	?	?	?

$\oslash$	$-$	0	$+$	?
$-$	$+$	U	$-$	U
0	0	U	0	U
$+$	$-$	U	$+$	U
?	?	U	?	U

1. $[\Delta k] \neq 0, [\Delta A] = 0, [\Delta B] = 0$: ブレーキブースターの故障
2. $[\Delta k] = 0, [\Delta A] = 0, [\Delta B] \neq 0$: 油圧漏れ
3. $[\Delta k] = 0, [\Delta A] = [\Delta B] \neq 0$: 油圧漏れ

に限られるため，未知数の一方に正常値を代入することができ，以下の式が得られる．

$$[\Delta \dot{p}] \oplus [\Delta A] \otimes [p] \oplus [\Delta p] = [\Delta q] \quad (12)$$
$$[\Delta \dot{p}] \oplus [\Delta q] = [\Delta B] \otimes [q] \oplus [\Delta q] \quad (13)$$

式 (9)(12)(13) の解を求めると以下のようになる．

$$\begin{aligned}
[\Delta k] &= ([\Delta q] \ominus [\Delta a]) \oslash [a] && (14)\\
[\Delta A] &= (([\Delta q] \ominus [\Delta \dot{p}]) \ominus [\Delta p]) \oslash [p] && (15)\\
[\Delta B] &= (([\Delta \dot{p}] \oplus [\Delta p]) \ominus [\Delta q]) \oslash [q] && (16)
\end{aligned}$$

4.2 Boole 代数による表現

実数 x に対し，$x \in [0, \infty) \equiv X_s, x \in (-\infty, 0] \equiv X_v$ の関係を満たす論理変数 (X_s, X_v) を導入する．ここでは以下の関係が成り立つ．

$$[x] = + \equiv x \in (0, \infty) \equiv X_s \bar{X}_v$$
$$[x] = - \equiv x \in (-\infty, 0) \equiv \bar{X}_s X_v$$
$$[x] = 0 \equiv x \in [0] \equiv X_s X_v$$

このとき，$X_s + X_v = 1$ であり，$\bar{X}_s \bar{X}_v = 0$ が常に成り立つから，$\bar{X}_s \bar{X}_v$ は組合せ禁止として扱う．なお，
$[x] = ? \equiv x \in (-\infty, +\infty) \equiv X_s + X_v$
であって恒真であるが，$[x] = ?$ の真の意味は「$[x] = +$ または $[x] = -$ または $[x] = 0$」であるから，新たに論理引数 P, Q を導入して，

$$[x] = ? \equiv (X_s = P) \wedge (X_v = Q) \text{ where } \bar{P}\bar{Q} \neq 1$$

として扱う．
この符号化により，例えばオペレータ $\oplus$ は以下のような Boole 関数として表現できる．但し，a, b に対する論理変数を $(A_s, A_v), (B_s, B_v)$ とする．

$$\begin{aligned}
&x = a \oplus b : \\
&\quad X_s = A_s B_s + P_1 \bar{A}_v + P_2 \bar{B}_v, \\
&\quad X_v = A_v B_v + Q_2 \bar{A}_s + Q_1 \bar{B}_s, \qquad (17)\\
&\text{where} \quad P_1, P_2, Q_1, Q_2\text{: parameters.}
\end{aligned}$$

上の式に於いて，parameter は不確定を表現する論理変数であり，例えば式 17 では，$A_s B_s (a, b \in [0, \infty))$ のときは必ず $X_s = 1 (x \in [0, \infty)$ であるが，$A_s \bar{B}_s (a \in [0, \infty), b \in (-\infty, 0))$ のときは，$X_s = P_1, X_v = P_2$ となる．外部より P_1, P_2 を与えることにより値を確定する．但し，$P_1 + P_2 = 1$ を満たす必要がある．$\ominus, \otimes, \oslash$ も同様に表すことができる．

5. Fault diagnosis

前節の方法によって図 2 に図式化した Boole 論理関数を生成する，これにより，故障を示す変数 $[\Delta k], [\Delta A], [\Delta B]$

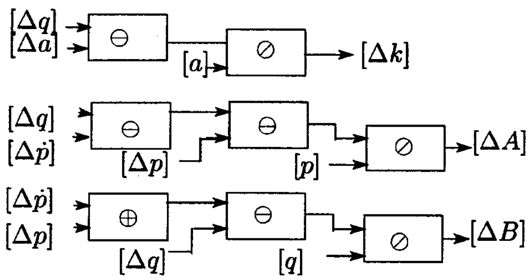

図 2: 診断論理関数

を出力することができる．

6. まとめ

提案した拡張 sign algebra は故障の伝搬関係を表現することに適しており，これを用いたブレーキシステムの故障診断モデルを提案した．この Boole 論理関数はハードウェア上に実装することによって高速な on-board 診断を行うことができる．より詳細な論理関数の構築が今後の課題である．

参考文献

[1] Celentano, G., Iervololino, R., Porreca,S. and Fontana,V.: Car Brake System Modeling for Longitudinal Control Design, Proc. of 2003 IEEE Conference on Control Applications, pp25-30 (2003)

[2] 平塚 盧 房岡, "モデルベース診断に基づく On-Board 診断の一方法", 組込みシステムシンポジウム 2007 論文集（ESS2007）pp185-192、情報処理学会（2007）

[3] Williams, B.: MINEMA: A symbolic approach to qualitative algebraic reasoning, *Proc. 7th National Conf. on Artificial Intelligence*, pp. 264–269 (1988).