

オブザーバ，カルマンフィルタを併用した 故障検出性能の向上

M2007MM036 吉田 一秀

指導教員: 高見 勲

1 はじめに

近年，機械工場や化学プラントなどの産業システムはますます複雑化，大規模化している．これらのシステムで，いったん事故が起こると，甚大な被害が生じる．また，定期検査を怠ったためにシステムの劣化や欠点を発見できず事故に至ることが多々発生している．このような理由より，プラントの異常箇所，異常状態を早期に発見することは被害を未然に防ぐために必要不可欠な技術である．従来，故障診断は人間の診断との対比で考えられることが多い．病気とは，数値が正常と考えられる範囲から外れる，あるいは検査薬反応を含め特徴的な様相が現れることで診断される．こうした特徴が医療関係者の知識により最終的に判断される[1]．故障診断の機能である異常検出では故障や異常を検知することが主要な役割である．したがって，異常を検出するには，プラントが計画どおりに動作しているかどうかを監視する必要がある．故障診断に関しては現在も多くの研究がなされている．故障診断には，ニューラルネットワーク，GAなどのプロセスモデルを用いない方法，パリティベクトル法，確率モデルなどの静的モデルを用いる方法などがあり，モデルに基づく故障診断の手法としては，残差法やパラメータ同定などが挙げられる[2]．今回は，制御対象としてタンクシステムを用いる．タンクシステムの底部から水が漏れ出すようにしそれをクラック(亀裂)と見立てて故障を表現する．その故障を未知な外乱とみなし外乱推定オブザーバ，カルマンフィルタの2つの状態推定機構によって検出する．外乱推定オブザーバは，システムに侵入する外乱をシステムの状態の一部として推定するものである．カルマンフィルタも外乱推定オブザーバと同様に未知な外乱を推定する．ただ，カルマンフィルタの場合はコントローラを設計する際にシステムノイズや観測ノイズを評価関数に含めるため外乱推定オブザーバよりもノイズに対する影響を軽減できる．故障診断において考えられる重要な性能とは故障をいかに早く検出できるか，また小さな故障をどこまで検出できるかということである．この2つの要求をふまえた上で，本研究で用いる2つの状態推定機構で故障診断をする際に，外乱推定オブザーバは故障信号の推定速度を比較的重視した設計仕様であり，カルマンフィルタは外乱推定オブザーバに比べて推定速度は劣るもののノイズに対しての影響を軽減し検出精度を重視した設計仕様になっている．この2つの状態推定機構を組み合わせることにより故障検出の性能を向上することを目的とする．

2 故障ベクトルの表現

本研究では故障ベクトルを未知な外乱と見立ててシステムに混入させる．その時のブロック線図を示す．

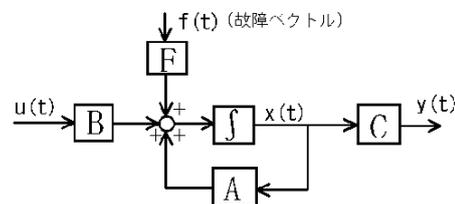


図 1: 故障ベクトル混入時のブロック線図

このシステムに故障ベクトル $f(t)$ と係数行列 F を加えた数学的モデルを次に示す．

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ff(t) \quad (1)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (2)$$

$f(t)$ は故障発生を表すベクトルで，一般に

$$f(t) = [f_1(t) \ f_2(t) \ \cdots \ f_i(t)]^T \quad (3)$$

$f_i(t)$ とは， i 番目の故障を表すことになる．また，故障ベクトルは，平常時は $f_i(t) = 0$ ，故障発生時には $f_i(t) \neq 0$ とする．本研究では， $f_i(t) = 0$ であるかどうかを検出する．

3 外乱推定オブザーバによる故障ベクトル推定

3.1 外乱推定オブザーバの構成法

本論文で適用する外乱推定オブザーバの構成法の概要を説明する．外乱推定オブザーバの構成法は，大きく2つのステップに分けられる．

step1. 外乱を状態の一つとして含めた系システムをに拡張し，この拡大系が可観測であることを確認する．

step2. 拡大系を新たなシステムとみなし，それに対してオブザーバを構成する．

上記の2つのステップをふまえたうえで，(1)，(2)のシステムを考える．ここで，システムは可観測と仮定する．また， $x(t)$ は状態ベクトル， $u(t)$ は制御入力ベクトル， $y(t)$ は制御出力ベクトル，そして $f(t)$ はシステムに侵入する外乱ベクトルである．行列 F は外乱がシステムに侵入する時の経路を決定するもので，外乱推定オブザーバが適用される推定問題の目的に応じて設定する．

3.2 拡大系の構成

(1)より，外乱をシステムの状態に含めると次式の拡大系が構成される．

$$\dot{x}_e(t) = A_e x_e(t) + B_e u(t) \quad (4)$$

$$y(t) = C_e x_e(t) \quad (5)$$

$$x_e(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ f(t) \end{bmatrix}, A_e = \begin{bmatrix} A & F \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$B_e = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, C_e = \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

上式は、測定されない状態 $f(t)$ を有するシステムとみなせる。したがって、このシステムに基づいてオブザーバを構成すれば故障ベクトル $f(t)$ を推定するオブザーバが実現されたことになる。

3.3 外乱推定オブザーバの構成

前節で作成した拡大系を用いて外乱推定オブザーバを構成する。(6), (7)の拡大系を新たなシステムとして従来のオブザーバの構成法に基づいて設計を行うことができる。今回は、拡大系の状態 $x = [x(t) \ f(t)]^T$ をすべて推定する同一次元オブザーバを用いた。この時の、オブザーバは次式に基づいて構成する。

$$\dot{\hat{x}}_e(t) = A_e \hat{x}_e(t) + B_e u(t) - K_e \varepsilon(t) \quad (8)$$

$$\hat{y}(t) = C_e \hat{x}_e(t), \varepsilon(t) = \hat{y}(t) - y(t) \quad (9)$$

$$\hat{x}_e(t) = \begin{bmatrix} \hat{x}(t) \\ \hat{f}(t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

ここに、 \hat{x}_e は状態 x の推定値で、 A_e, B_e, C_e はそれぞれ拡大系のシステム行列、駆動行列、出力行列、そして K_e はオブザーバゲインである。

4 カルマンフィルタによる故障ベクトル推定

4.1 カルマンフィルタの構成法

前章で構成した拡大系(6), (7)を用いて次のシステムを考える。

$$\dot{x}(t) = A_e x(t) + B_e u(t) + v(t) \quad (11)$$

$$y(t) = C_e x(t) + w(t) \quad (12)$$

$v(t)$ はシステム雑音(System Noise)と呼ばれる測定不可能な不規則な外乱、 $w(t)$ は測定雑音(Measurement Noise)と呼ばれる、出力測定時に混入する不規則な外乱である。上記のシステムにおいて、 $v(t), w(t)$ は白色雑音(White Noise)で、 $(C_e \ A_e)$ は可観測と仮定する。外乱や初期値に対する仮定として、まず $v(t), w(t)$ は平均値零、すなわち

$$E[v(t)] \ E[w(t)] = 0 \quad (13)$$

で、その共分散行列が

$$E[v(t)v(\tau)^T] = Q\delta(t - \tau) \quad E[w(t)w(\tau)^T] = R\delta(t - \tau) \quad (14)$$

となる。ただし、 $Q(n \times n) \succeq 0, R(l \times l) \succ 0$ である。また、行列 Q, R に対して、評価関数

$$J = \int_0^{\infty} [x(t)^T Q x(t) + u(t)^T R u(t)] dt \quad (15)$$

を最小化するようなフィードバックゲイン L_e を求める。 L_e は

$$L_e = P C_e^T R^{-1} \quad (16)$$

で与えられる。ただし、 P はリカッチ方程式

$$P A_e^T + A_e P - P C_e^T R^{-1} C_e P + Q = 0 \quad (17)$$

を満たす正定の唯一解である。

4.2 重み行列の決定

システム雑音 Q と測定雑音 R の決定をする。測定雑音 R は出力測定時に混入する不規則性の外乱なので本研究で用いるタンクシステムにおいては水位の揺らぎの高さを実測したものをとした。システム雑音 Q は測定不可能な不規則性の外乱である。よって、 Q は本来は任意に決定するものであるが本研究では、 Q は任意ではなくタンクシステムの設計を行った際のモデル誤差を用いた。

・測定雑音 R の決定

実際にタンクシステムで実験を行い、得られた出力結果から水位の揺らぎを測定した。タンクシステムにおける水位は基準点より高さ約 ± 0.144 cmで揺動していることを確認した。

・システム雑音 Q の決定

測定不可能なシステム雑音を適当な結果が得られるまで試行錯誤が要される。よって、本研究ではモデル誤差を用いることにより任意ではなく理論づけさせることにした。タンクシステムをモデリングする際に平衡点を15cmとして設計した。そこで、平衡点を10cmとして設計したモデルとの誤差をシステム雑音 Q とした。

5 シミュレーション

5.1 プラントモデル

ポンプによって汲み上げた水をタンクに供給する、1入力1出力システムを制御対象とする。前章までで述べた推定手法をタンクシステムに適用する。ここで、タンクシステムの概要図を下図に示す。各記号は次のとおりである。

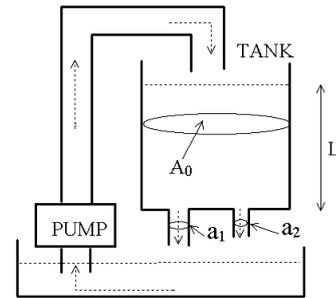


図 2: タンクシステム

A_0 : TANKの断面積[m²]

a_1 : TANKの取り出し口断面積[m²]

a_2 : TANKの取り出し口断面積[m²]

L : TANKの水位の平衡点[m]

V : ポンプに印加される電圧[V]

K : ポンプ定数

g : 重力加速度[m/s²]

対象となるプラントは線形時不変系で次のような状態方程式で記述されているとする。

$$\dot{x}_p(t) = A_p x_p(t) + B_p u_p(t) \quad (18)$$

$$y_p(t) = C_p x_p(t) \quad (19)$$

各係数 A, B, C を示す。

$$A = -\frac{a_1}{A_0} \sqrt{\frac{g}{2L}} \quad B = \frac{K}{A_0} \quad C = 1 \quad (20)$$

5.1.1 タンクシステムのセンサ

タンクシステムの実際の水位は圧力センサによって計測される。圧力センサはタンクの底部に取り付けられており、水の垂直レベルに比例して水位の値を出力する。よって、水面の揺らぎによりセンサにかかる圧力が変化し、その変動がタンクシステムのノイズとなる。

5.2 シミュレーション結果

まず、タンクシステムの故障について述べる。タンクシステムの底についている別の流出口(a_2)からも水が流れるようにし、それをクラック(亀裂)と見立てて故障を表現する。前節のモデルおよび推定法に基づいてタンクの水位、故障ベクトル推定のシミュレーションを行った。タンクの水位の平衡点を15cmとしてシミュレーション開始時の100秒後にクラック(亀裂)を故障ベクトルとしてステップ状に混入させる。故障ベクトルが混入した際に水位センサによるノイズの影響がまったくない場合は $f(t) = 0$ である。しかし、実際はノイズが混入することがわかっている。よって、ノイズを考慮に入れた時の正常区間として $f(t)$ の範囲に幅を持たせる。シミュレーションは2パターン行った。

case1: $f(t) = -0.1$ の時(故障検出の速度重視)

case2: $f(t) = -0.02$ の時(故障検出の精度重視)

5.2.1 case1: $f(t) = -0.1$ の時

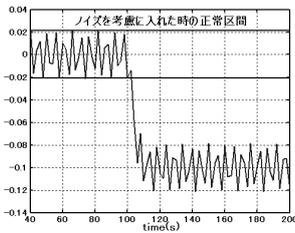


図 3: 外乱推定オブザーバによる $f(t)$ の推定値

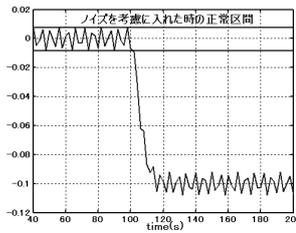


図 4: カルマンフィルタによる $f(t)$ の推定値

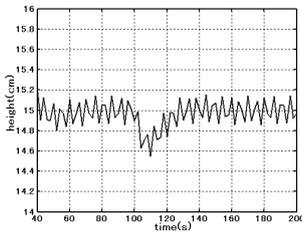


図 5: タンクの水位

図3, 4は故障ベクトルを外乱推定オブザーバとカルマンフィルタによって推定した結果で、正常区間内に信号が収まっていればシステムは正常である。100秒後に故障ベクトルを混入した際、外乱推定オブザーバ、カルマンフィルタ共に正常区間から外れているので故障が検出できている。この時、外乱推定オブザーバはカルマンフィルタよりも約10秒早く故障が検出できている。このことから外乱推定オブザーバが推定速度を重視した設計になっていることがわかる。図5は100秒後に故障ベクトルが混

入した時のタンクの水位の経過。追従制御を行っているため水位の経過では故障かどうかの判別はできない。

5.2.2 case2: $f(t) = -0.02$ の時

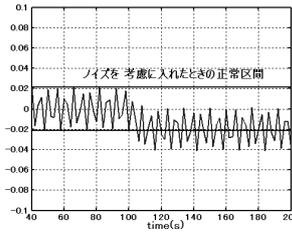


図 6: 外乱推定オブザーバによる $f(t)$ の推定値

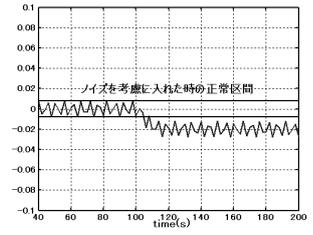


図 7: カルマンフィルタによる $f(t)$ の推定値

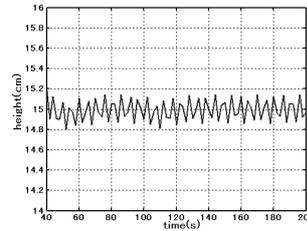


図 8: タンクの水位

図6, 7は故障ベクトルを外乱推定オブザーバとカルマンフィルタによって推定した結果である。100秒後に故障ベクトルが混入した際、外乱推定オブザーバは圧力センサによって発生するノイズの影響を受けているため故障しているのかどうかの判別が不可能である。一方、カルマンフィルタは外乱推定オブザーバとは違い、圧力センサによるノイズを軽減しているため正常区間から外れていることが見て取れるので故障を検出できている。このことからカルマンフィルタが検出精度を重視した設計になっていることがわかる。図8は100秒後に故障信号が混入した時のタンクの水位の経過。故障ベクトルが微小のため水位の経過からは故障が起きているかどうかはまったく判別できない。

6 実験

シミュレーションと同様に2つのパターンで行った。
case1:推定速度重視の外乱推定オブザーバの優位性の実証
case2:検出精度重視のカルマンフィルタの優位性の実証

6.1 case1:推定速度重視の外乱推定オブザーバの優位性の実証

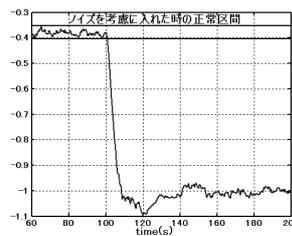


図 9: 外乱推定オブザーバによる故障推定

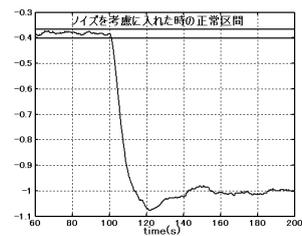


図 10: カルマンフィルタによる故障推定

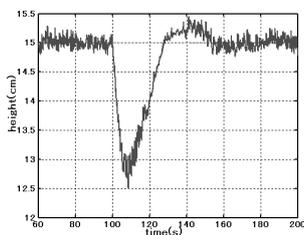


図 11: タンクの水位

図9, 10はタンクのクラックを外乱推定オブザーバとカルマンフィルタによって推定した結果である。正常時の信号にオフセットが残っていることがわかる。しかし、このオフセットは故障を検出する上で重要でないと判断し正常時の正常区間を上図のように定めた。正常区間内に信号が収まっていればシステムは正常である。100秒後に故障を発生させた際、外乱推定オブザーバ、カルマンフィルタ共に正常区間から外れているため故障を検出できている。この時、外乱推定オブザーバはカルマンフィルタよりも約10秒早く故障を検出している。このことから外乱推定オブザーバが推定速度を重視した設計になっていることがわかる。図11は100秒後に故障が発生した時のタンクの水位の経過でありタンクの水位からは故障かどうかは判別できない。

6.1.1 case2: 検出精度重視のカルマンフィルタの優位性の実証

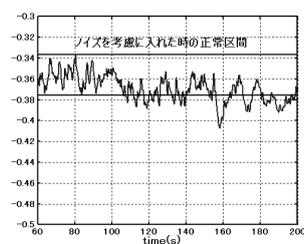


図 12: 外乱推定オブザーバによる故障推定

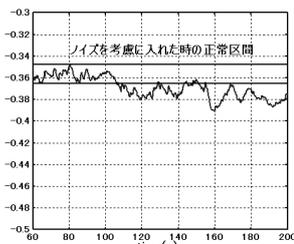


図 13: カルマンフィルタによる故障推定

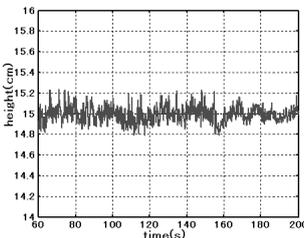


図 14: タンクの水位

図12, 13はタンクのクラックを外乱推定オブザーバとカルマンフィルタによって推定した結果である。100秒後に故障を発生させた際、外乱推定オブザーバは圧力センサによって発生するノイズの影響を受けているため故障しているかどうかの判別が不可能である。一方、カルマンフィルタは外乱推定オブザーバとは違い、圧力センサによるノイズを軽減しているため正常区間から外れていることが見て取れるので故障を検出できている。このことからカルマンフィルタが検出精度を重視した設計になっ

ていることがわかる。図14は100秒後に故障が発生した時のタンクの水位の経過。タンクからもれる水が微小のため水位の経過からは故障は起きていないようにみえる。

6.2 故障検出精度の実証

タンクシステムの平衡点を15cmとして平衡状態を保つために必要な流量と実際に穴を開けた時に流れ出る流量の比較を行うことにより故障検出の精度を数値化する。

- ・平衡状態を保つための流量: $1456/60 = 24.2[g/s]$
- ・穴を開けたときに流れ出る流量: $20/60 = 0.33[g/s]$

以上より本研究で設計した状態推定機構は平衡状態における流量の約1.4%以上のクラックに対してまでならば検出が可能である。

7 まとめ

本研究では、システムの故障を検出する例として、タンクシステムを用いた。診断手法としては、2つの状態推定機構を独立に設計し、それぞれが個別に故障を検出するという方法をとった。外乱推定オブザーバでは、タンクにおける故障を未知の外乱としてとらえシステムに混入させた。その時の外乱を新たな状態として考えてオブザーバを構成することにより故障を検出した。カルマンフィルタも、外乱推定オブザーバと同様に設計したがゲインを決定する際に評価関数の重みにシステム雑音と測定雑音を用いることによりノイズの影響を軽減し故障検出精度を向上することができた。以上の理論に基づきシミュレーション、実験を行うことにより理論の妥当性を確認できた。

参考文献

- [1] 幸田武久: システム事故防止における故障診断, システム制御情報学会誌, 51-12, 527/532 (2007)
- [2] 木戸和夫, 梅井一英, 山浦広己: 知識に基づく故障診断技術-モデル挙動との比較による特定-, 三菱自動車テクニカルレビュー, 19, 33/39 (2007)
- [3] 井上昭, 吉永慎一, 岡崎聡: 適応オブザーバを用いたプロセス系の故障診断, 計測自動制御学会論文集, 43-7, 621/623 (2007)
- [4] Akira Inoue, Miincong Deng and Shin-ichi Yoshinaga: Fault Detection for Uncertain System Using Adaptive Sliding-mode Disturbance Observer, Industrial Technology, 2006. ICIT 2006. IEEE International Conference on, 2631/2634 (2006)
- [5] Akira Inoue, Miincong Deng and Shin-ichi Yoshinaga: Fault Detection by Using an Adaptive Observer, Proc. of the 2005 International Conference on Control, Automation and Systems, 710/713 (2005)
- [6] 梅野孝治: 外乱オブザーバに基づく車両状態推定, 豊田中央研究所R&Dレビュー, 29-4, 23/32 (1994)
- [7] 橋本雅文, 川島洋之, 大場史憲: マルチモデル法に基づく移動ロボットの境界センサ系の故障診断: カルマンフィルタによるスケール故障の診断, 日本機械学会論文集. C編, 69-679, 654/661 (2003)