Kalman filter を用いた FPSO の定点保持制御系に関する研究

学生員 安 暎 奎* 正員 貴 島 勝 郎**
正員 古 川 芳 孝**

On the Dynamic Positioning Control System of FPSO using Kalman Filtering Techniques

by Youngkyu Ahn, *Member* Katsuro Kijima, *Member*
Yoshitaka Furukawa, *Member*

Summary

When a FPSO (Floating Production Storage and Offloading) is required to maintain the specified position during oil producing and offloading under the external forces such as ocean current, wind or wave, exact position measurement is firstly taken into consideration. GPS (Global Positioning System) is mainly used to measure ship's position. But the position measurements using GPS contain noise. This noise has large influence on DPS (Dynamic Positioning System), therefore it is necessary to remove the noise.

In this paper, Inverse Linear Quadratic (ILQ) optimal servo theory using Kalman filter is applied to design control system of DPS. Generally, Kalman filter is to estimate the low-frequency motions of the vessel so that control can be applied to minimise the position error. But in this paper, Because we already consider motion of FPSO as low-frequency motion, Kalman filter is used to remove the measurement noise.

The numerical simulations shows the performance of the combined Kalman filter and ILQ optimal servo system.

1. 緒 言

海底油田からライザー管を用いて石油を採取する FPSO は、外乱として作用する潮流、風、波の影響を受けながら定点保持を行う必要がある。定点保持を行う際にまず考えなければならないことは、外乱を受けて運動している船舶の位置を正確に計測できているかどうかである。

従来の船舶の位置を計測する方法としては、Acoustic system と Taut-wire system がよく利用されていたが、1960 年代後半に GPS (Global Positioning System) が民間でも利用可能になったことから、殆どの船はその位置計測に GPS を使うようになった。一般的に GPS は計測システムとして優れた性能を有しているが、計測時に生ずる誤差によってその精度が落ちることがある。すなわち、GPS の計測精度は約 100m であり、より高精度である DGPS (Differential GPS) の場合でも 2-10m の誤差が生ずる¹⁾。FPSO の定点保持制御を行う場合、GPS の誤差は FPSO の水平方向変位

* 九州大学大学院工学府

**九州大学大学院工学研究院

の許容範囲から見るとかなり大きいと考えられるので、その誤差をできるだけ小さくする必要がある。一般的に観測誤差を小さくする方法としては、filtering 法がよく利用されるので、本研究では制御システムとして、誤差の影響を減らす Kalman filter を適用した ILQ 最適制御則を用いて、外乱下にある FPSO の定点保持性能に関する研究を行った。

2. FPSO の運動方程式

潮流・風・波などの外乱の影響下において FPSO の定点保持を行うことを考える。その時、用いる座標系を Fig.1 に示す。 $o - x_0y_0$ を空間固定座標系、 $G - xy$ を FPSO の重心を原点とする船体固定座標系とする。また潮流速、風速をそれぞれ V_C, V_W 、潮流の方向、風向、波の方向をそれぞれ α, ν, χ とする。潮流による外力を X_C, Y_C, N_C 、風による外力を X_W, Y_W, N_W 、波による漂流力を X_D, Y_D, N_D 、スラスターによる制御力を X_{Th}, Y_{Th}, N_{Th} とする。この場合、FPSO の操縦運動方程式は次式のように表すことができる。

Fig. 1 Coordinate systems

$$\left. \begin{aligned} (m + m_x)\dot{u} - (m + m_y)vr - (m_x - m_y) \times \\ V_C r \sin(\psi - \alpha) &= X_C + X_W + X_D + X_{Th} \\ (m + m_y)\dot{v} + (m + m_x)ur - (m_y - m_x) \times \\ V_C r \cos(\psi - \alpha) &= Y_C + Y_W + Y_D + Y_{Th} \\ (I_{zz} + i_{zz})\dot{r} &= N_C + N_W + N_D + N_{Th} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、

- m, m_x, m_y : FPSO の質量および x 軸, y 軸方向の付加質量
- I_{zz}, i_{zz} : z 軸回りの慣性モーメントおよび付加慣性モーメント
- u, v, r : x 軸, y 軸方向の速度および回頭角速度
- ψ : FPSO の回頭角

ただし、潮流力については実験データを用いてフーリエ級数を使って表し²⁾、風圧力については藤原³⁾の方法を用いた。波漂流力については Newman⁴⁾の式を用いることにした。また検討の対象とする FPSO は Main スラスターに加えて Bow スラスター、Stern スラスターを装備しているものとする、スラスターによる制御力 X_{Th}, Y_{Th}, N_{Th} は次式のように表すことができる。

$$\left. \begin{aligned} X_{Th} &= \tau_M \\ Y_{Th} &= \tau_S + \tau_B \\ N_{Th} &= FT \times \tau_B - AT \times \tau_S \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、 τ_M, τ_S, τ_B はそれぞれ Main スラスター、Stern スラスター、Bow スラスターが発生する推力である。また、 AT, FT は重心から Stern スラスター、Bow スラスター設置位置までの距離を表す。

3. ILQ 設計法と Kalman filter

3.1 ILQ 設計法

制御系の設計を行うために、まず (1) 式で表される運動方程式を目標点のまわりで線形化し、以下の可制御、可観測な m 入力、 m 出力、 n 次元の状態方程式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + w \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} A(n \times n), B(n \times m), C(m \times n), \\ x = (u, v, r, x_0, y_0, \psi)^T, u = (\tau_M, \tau_S, \tau_B) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

(3)、(4) 式で表される制御系に対し、以下の方法で ILQ 最適サーボ系を構成する。

1. 相対次数 d_i と非干渉化行列 D を求め、 D の正則性を確認する。
2. (3) 式で表される制御対象の零点を求め、それが安定であることを確認する。

3. $G_{yr}(s)$ を規定する多項式 $\phi_i(s)$ を最も簡単な次の形で与える。

$$\phi_i(s) = (s - s_i)^{d_i}, \quad s_i = -\frac{1}{T_i} \quad (1 \leq i \leq m)$$

つまり、第 i 目標入力から第 i 出力への伝達関数を高次 (d_i 次) 遅れ系の伝達関数

$$\frac{1}{(T_i s + 1)^{d_i}}$$

に選び、そのときの時定数 T_i を設計仕様として与える。

4. $\phi_i(A)$ を

$$\phi_i(A) = (A - s_i I)^{d_i} \quad (1 \leq i \leq m)$$

とおいて非干渉化ゲイン K を求め、それをもとに基準最適ゲイン K_F^0, K_I^0 を求める。

5. ゲイン調整パラメータの下限 σ を計算し、 $\sigma_i > \sigma$ となる範囲内で各 σ_i の値を選ぶ。

6. ILQ 最適サーボ系を Fig.2 のように構成する。ただし、 $\Sigma = \text{diag} \{ \sigma_i \}$ である。

なお、相対次数や非干渉化行列などについては、文献⁵⁾に詳しいので、ここでは説明は省略する。

Fig. 2 ILQ servo system

3.2 Kalman filter

一般的に船舶の運動は低周波数運動成分と高周波数運動成分の和として表される。低周波数運動成分は風、潮流、波漂流力による運動であり、高周波数運動成分は一次の波強制力によって発生する。定点保持問題においての filtering は船舶の低周波数運動を推定して位置計測に含まれる誤差を最小にする制御を適用することである。

(1) 式に示したように波強制力に基づく運動はここでは考慮していないため、FPSO の運動は低周波数運動となる。従って、本研究では位置計測に含まれる誤差の影響を少なくする問題について考える。まず、Kalman filter について簡単に説明する。システム雑音 $w(t)$ と観測雑

音 $q(t)$ がともに正規白色性定常過程の場合、状態方程式と測定方程式は次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + w(t) \\ y(t) &= Cx(t) + q(t) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} E[w(t)] &= 0, \quad E[q(t)] = 0 \\ E[w(t)w^T(t)] &= W(t)\delta(t-\tau) \\ E[q(t)q^T(t)] &= Q(t)\delta(t-\tau) \\ E[w(t)q^T(t)] &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここで、 E は期待値を表し、 $\delta(t-\tau)$ はデルタ関数とする。また $W(t)$ と $Q(t)$ は正定値とする。

(5) 式のようなシステムにおいて Kalman filter は次のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \hat{x}(t) &= A\hat{x}(t) + K(t)\{y(t) - C\hat{x}(t)\} \\ &= \{A(t) - K(t)C(t)\}\hat{x}(t) + K(t)y(t) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ここで $\hat{x}(t)$ は最適推定値を表し、 $K(t)$ は Kalman 利得行列で、有本—Potter の方法⁶⁾によって求められる。

観測雑音がある場合、Kalman filter を用いた ILQ 最適サーボ系を Fig.3 のように構成する。

Fig. 3 Kalman filter applied to ILQ servo system

4. Kalman filter の効果の検証

前章において構成した Kalman filter の効果を検証するために、位置の計測結果を想定した任意のデータに対して白色雑音を付加し、Kalman filter を適用して推定した結果と元のデータとの比較を行った。Fig.4に白色雑音の時系列、Fig.5に位置計測データの真の値、白色雑

音を付加した値、Kalman filter を用いて推定した結果をそれぞれ示す。Fig.5を見ると、計測データは白色雑音の影響によって大きく変動するが、Kalman filter を適用することで真の値に近い推定値を得ることができた。

Fig. 4 Time history of white noise

Fig. 5 Comparison of estimated data and original data

5. 計算対象船と計算条件

5.1 計算対象船

本研究では定点保持制御系のシミュレーション計算を行う際の計算対象船として、ESSO OSAKA 船型を利用した。その船型を Fig.6に、主要目を Table 1に示す。

Table 1 Principal particulars of FPSO

L_{pp} (m)	216.67
B (m)	35.33
d (m)	14.70
C_b	0.829
Main Thruster(kN)	1800
Bow Thruster(kN)	720
Stern Thruster(kN)	480

Fig. 6 Profile of FPSO

5.2 計算条件

計算条件として、Fig.7に示すように、FPSO が単独で外乱の方向に回頭するように制御を行う場合を考えた。また、稼動水深は 500m と仮定し、目標点からの水平方向変位が水深の 5%にあたる 25m 以内になることを制御目標とする。

外乱の条件は、基本的に潮流速と風速は $V_C = 1.0$ (m/s), $V_W = 10.0$ (m/s) とし、潮流の方向と風向を $\alpha = 45^\circ$, $\nu = 45^\circ$ とした。制御パラメータである時定数 T_i (T_x, T_y, T_n : 制御対象の非干渉化によって制御システムの出力である各軸方向の変位と回頭角を定める時定数)、設計パラメータであるスラスタ推力の単位時間あたりの増減率 δ_{Th} 、外乱を受けてから制御開始までの時間 T_r をさまざまに変化させてシミュレーション計算を行い、その特性を検討した。

Fig. 7 Calculation conditions

FPSO の定点保持を行う場合、位置計測時に観測誤差が発生すると、制御システムは観測誤差を含む値に基づき、誤った判断を行い、本来の目標値とは異なる方向へ向かって FPSO が運動する恐れがある。観測誤差の中で FPSO の定点保持性能に最も影響を与えられ考えるのは水平方向変位 x, y に関する誤差である。回頭角 ψ に関しては、一般的に船に搭載されているジャイロによって計測されるが、現在使用されているジャイロのドリフトは殆ど 3 (deg/h) 以下であるので、FPSO の定点保持に与える誤差の影響は小さいと考えられる。従って、水平方向の観測誤差が FPSO の定点保持性能に及ぼす影響を検討するため、 x, y 軸方向の変位に関する観測誤差 $\varepsilon(\varepsilon_x, \varepsilon_y)$ の大きさを変化させてシミュレーション計算を行った。また FPSO の位置を計測する GPS の観測誤差としては、Fig.8に示すようにランダムな観測誤差を仮定した。

Fig. 8 Example of white noise distribution

6. 計算結果と考察

まず、観測誤差の大きさ $\varepsilon(\varepsilon_x, \varepsilon_y)$ が制御性能に及ぼす影響を検討するためシミュレーション計算を行った。計算条件として、1秒あたりのスラスター推力の増減率 δ_{Th} を最大出力の5%、制御開始までの時間 T_r を10(s)に設定した。設計パラメータはこれらの値を基本とし、特に断らないかぎり、この値を使うこととする。制御パラメータのゲイン調整パラメータ基本値 σ_B については、下限値 $\underline{\sigma}$ を用いて $\sigma_B = \underline{\sigma} + 0.01$ に設定した。ゲイン調整パラメータについては、基本値 σ_B を使って $\sigma = \sigma_B \times \sigma_{times}$ とした。ここで σ_{times} はゲイン調整パラメータの大きさを決める制御パラメータである。制御パラメータは $\sigma_{times} = 1.5$ とし、時定数 T_i ($T_x = T_y = T_n$) を200(s)に固定してシミュレーション計算を行った。

まず、Fig.9に観測誤差がない場合 ($\varepsilon = 0m$) について、速度 u, v 、位置 x, y 、回頭角速度 r 、回頭角 ψ 、スラスターの出力 τ の時系列、ノイズの大きさ $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ ならびに FPSO の重心の軌跡を示す。観測誤差がない場合には、スラスター出力はなめらかに変動し、FPSO は速やかに目標点である原点にもどることが可能になっている。一方、観測誤差が $\varepsilon = 0.5m$ の場合の Fig.10について見ると、左例に示した Kalman filter を使用しない場合には位置の計測値 x, y に含まれる計測誤差の影響によって、スラスター出力が激しく変動しているが、Kalman filter を使用した場合には観測誤差がない場合の Fig.9と比べて FPSO 重心の軌跡が少し大きくなっているものの、他にはあまり影響を与えていないことが分かる。これは観測誤差が小さい場合は ILQ 制御系に含まれた Kalman filter の働きによって観測誤差の影響がほとんど無くなり、十分精度の高い推定値が得られていることを示している。

Fig.11に示した観測誤差 $\varepsilon = 2.0m$ の場合について見ると、左例に示した Kalman filter を使用しない場合に

は観測誤差が大きくなるにつれ、FPSO が水平方向に激しく運動するため、本研究で用いた制御システムでは制御不可能になることが分かった。しかし、Kalman filter を使用した場合の FPSO の重心の軌跡の数値計算結果を見ると、Fig.9の計算結果に比べて水平変位が少し大きくなり、回頭角速度 r と Bow, Stern スラスターの出力が小刻みに変動していることが分かる。この変動の原因としては、観測誤差が大きくなるにつれて、Kalman filter による推定精度が悪化していることが考えられる。推定精度の悪化により、FPSO の運動は観測誤差が無い場合の軌跡から大きくはずれようとするため、それを防ぐためにスラスターの出力が変動しているものと考えられる。また、回頭角速度 r には観測誤差が含まれていないが、スラスター出力が目標とする位置を保つために小刻みに変動しているので、その影響によって r が変動しているものと考えられる。

観測誤差 $\varepsilon = 6.0m$ の数値計算結果である Fig.12の場合について検討して見ると、Kalman filter を使用しない場合は観測誤差が FPSO の水平方向変位より大きくなり、FPSO の運動を計算することができなかった。Kalman filter を使用した場合には回頭角速度 r と Bow, Stern スラスターの出力が大きく変動しており、水平変位が25m以内という制御目標を達成することができなかった。

Fig. 9 Influence of observation error on control performance of DPS for FPSO ($\varepsilon = 0.0m$)

Fig. 10 Influence of observation error on control performance of DPS for FPSO($\epsilon = 0.5\text{m}$)

Fig. 11 Influence of observation error on control performance of DPS for FPSO($\epsilon = 2.0\text{m}$)

Fig. 12 Influence of observation error on control performance of DPS for FPSO($\epsilon = 6.0\text{m}$)

次に、時定数 T_i 、スラスター出力の増減率 δ_{Th} が観測誤差を含む制御システムに及ぼす影響を検討するため、時定数 T_i を $T_x = T_y = T_n$ として、50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 800, 1000(s)、 δ_{Th} をスラスター最大出力の 1%, 3%, 5%, 8%、制御開始までの時間 T_r を 10(s) としてシミュレーション計算を行い、制御目標の達成の可否を調べた。その結果を Fig.13 ~ Fig.15 と Table 2 に示した。

まず、観測誤差がある場合に、スラスターの出力が FPSO の制御性能に与える影響を検討することを目的として、観測誤差を $\epsilon = 2.0\text{m}$ に固定し、 δ_{Th} を 1% ~ 8% と変化させながらシミュレーション計算を行なった。 $\delta_{Th} = 1\%$ の場合の数値計算結果である Fig.13 を見ると、FPSO の水平方向の変位が制御目標である 25m を超えていることが分かる。これは 1 秒あたりのスラスター推力の増減率 δ_{Th} が小さいため、Kalman filter から得られた推定値に基づいて要求されるスラスター推力を発揮することができず、制御目標の達成が不可能になっているものと考えられる。Fig.14 に示した $\delta_{Th} = 3\%$ の場合には、FPSO の水平方向の変位は制御目標である 25m 以内となっているものの、FPSO の水

平方向変位が観測誤差が無い場合の Fig.9 と比べて大きくなっていることが分かる。 $\delta_{Th} = 5\%$ である Fig.10 の数値計算結果を見ると、スラスタ出力が変動しており、FPSO の水平変位が観測誤差が無い場合と比べて若干大きくなるが、制御目標を達成していることが分かる。Fig.15 のようにスラスタ推力の増減率が 5% より大きい場合は全て制御目標を達成することが出来る。

次に時定数とスラスタ出力の増減率を変化した計算結果をまとめた Table 2 について検討する。ただし、Table 2 中の○印は制御目標を達成できた場合を表し、×印は制御目標を達成できなかった場合を表している。この結果を見ると、まず時定数 T に関して言えば、 $T = 50(s)$ のときは δ_{Th} の値に関らず目標を達成できていない。これは観測雑音がない場合の計算結果⁷⁾と同じように、スラスタの出力が目標とする制御力に追従できていないためであると思われる。従って、時定数については大きな値を設定した方が目標を達成しやすいものと考えられる。しかし、○印で示した制御目標を達成できた場合について時定数の影響を調べてみると、明らかに最大変位、制御目標達成までの時間ともに、時定数の値が小さい場合の方が優れていることが分かる。時定数の性質を考えると、基本的には時定数の値を小さくした方が制御目標達成までの時間等の点で、制御成績が良くなる。従って、時定数 T については制御目標を達成できる下限に設定するのが望ましいものと考えられる。

Fig.13 Time histories and trajectory of FPSO using Kalman filtering techniques($\delta_{Th} = 1.0\%$)

Fig.14 Time histories and trajectory of FPSO using Kalman filtering techniques($\delta_{Th} = 3.0\%$)

Fig.15 Time histories and trajectory of FPSO using Kalman filtering techniques($\delta_{Th} = 8.0\%$)

Table 2 Control results($T_r=10(s)$,
 $V_C=1.0(m/s)$, $V_W=10.0(m/s)$)

δ_{th}	$T(=T_x=T_y=T_n) (s)$								
	50	100	200	300	400	500	600	800	1000
1%	×	×	×	×	×	×	×	×	×
3%	×	×	○	○	○	○	○	×	×
5%	×	×	○	○	○	○	○	×	×
8%	×	○	○	○	○	○	○	×	×

7. 結 言

船の位置計測を行うとき時に生ずる観測誤差の影響を小さくするために、Kalman filter を用いた ILQ 制御系を構成し、FPSO の定点保持性能についてシミュレーション計算を行った結果、以下の結論を得た。

観測誤差が小さい場合は制御系に含まれている Kalman filter によって観測誤差の影響がほとんど無くなるため十分精度の高い推定値が得られた。しかし、観測誤差が大きくなると、Kalman filter による推定値の精度が落ちるため FPSO の水平変位が観測誤差が無い場合と比べて大きくなり、Bow と Stern スラスターの出力が大きく変動する。

観測雑音がある場合の時定数 T とスラスター推力の増減率 δ_{Th} については、観測雑音が無い場合と同じように制御目標を速く達成するために目標を達成できる下限に時定数を設定することと、スラスター推力の増減率 δ_{Th} を大きくすることによって、制御目標が達成しやすくなることが分かった。

参 考 文 献

- 1) 山田多津人：“GPS による位置計測技術”、船舶性能評価における GPS の利用に関するシンポジウム、西部造船会技術研究会性能部会 (1999)、pp.20-34
- 2) 高品純志：“タグによる操縦運動とその計算法について”、日本造船学会論文集、第 160 号 (1986)、pp.93-102
- 3) 藤原敏文、上野道雄、二村 正：“船体に働く風圧力の推定”、日本造船学会論文集、第 183 号 (1998)、pp.77-90
- 4) J.N. Newman：“The Drift Force and Moment on Ship in Waves”、Journal of Ship Research, Vol.11 (1967)
- 5) 木村英紀、藤井隆雄、森武宏：“現代制御シリーズ 8 ロバスト制御”、コロナ社 (1994)
- 6) 白石昌武：“入門現代制御理論”、日刊工業新聞社 (2000)
- 7) 貴島勝郎、古川芳孝、高澄東太、安暎奎：“FPSO の定点保持に関する研究”、西部造船会々報、第 102 号 (2001)、pp.173-185
- 8) 安暎奎、貴島勝郎、古川芳孝：“FPSO の定点保持に関する研究 (続)”、西部造船会々報、第 103 号 (2002)、pp.135-146