MATLAB LAB 16 | مختبر MATLAB 16

Building a Simple Digital Twin

بناء توأم رقمي مبسط

Streaming measurements, model updating, anomaly detection, and prediction

القياسات المتدفقة وتحديث النموذج وكشف الشذوذ والتنبؤ

Prepared by | إعداد: Dr.-Ing. Aouss Gabash | د. م. أوس غباش

🎯 Objectives

- Simulate streaming power-system measurements.
- Build a simple physical process model.
- Synchronize the digital state with noisy measurements.
- Apply moving-average filtering and residual analysis.
- Detect abnormal behavior automatically.
- Evaluate model accuracy using RMSE and alarm statistics.

🎯 الأهداف

- محاكاة قياسات متدفقة من نظام قدرة.
- بناء نموذج فيزيائي مبسط.
- مزامنة الحالة الرقمية مع القياسات المشوشة.
- استخدام المتوسط المتحرك وتحليل البواقي.
- كشف السلوك غير الطبيعي تلقائيًا.
- تقييم الدقة باستخدام RMSE وإحصاءات الإنذار.

1. Laboratory Scenario

We model the active power of a feeder. The physical process changes smoothly with load demand, while the measurement contains noise. At a selected time, an abnormal increase is introduced.

$$P_{true}(k) = P_0 + A\sin(\omega t_k) + d(k)$$

$$P_{meas}(k) = P_{true}(k) + v(k)$$

The digital twin predicts the next value and corrects it using the measurement.

1. سيناريو المختبر

نمثل القدرة الفعالة لمغذٍ كهربائي. تتغير القدرة الحقيقية بسلاسة، بينما تحتوي القياسات على ضوضاء، ثم نضيف حالة غير طبيعية لقياس قدرة التوأم على اكتشافها.

2. Complete MATLAB Program

```
clear; clc; close all;
rng(16);

%% Simulation settings
Ts = 0.1;                 % Sampling time [s]
t  = 0:Ts:100;
N  = numel(t);

%% Physical-system signal
P0 = 100;                 % Base power [kW]
A  = 10;                  % Oscillation amplitude [kW]
Ptrue = P0 + A*sin(0.2*t);

%% Introduce an abnormal event
attackStart = 650;
attackEnd   = 760;
Ptrue(attackStart:attackEnd) = ...
    Ptrue(attackStart:attackEnd) + 18;

%% Noisy measurements
sigmaNoise = 1.5;
Pmeas = Ptrue + sigmaNoise*randn(size(t));

%% Digital-twin state update
Ptwin = zeros(size(t));
Ptwin(1) = Pmeas(1);
alpha = 0.18;             % Measurement correction gain

for k = 2:N
    % Simple model prediction
    Ppred = Ptwin(k-1);

    % Measurement correction
    Ptwin(k) = Ppred + alpha*(Pmeas(k)-Ppred);
end

%% Residual and adaptive threshold
residual = Pmeas - Ptwin;
normalIndex = 1:500;
```

```
muR = mean(residual(normalIndex));
sigmaR = std(residual(normalIndex));
threshold = abs(muR) + 3*sigmaR;
alarm = abs(residual) > threshold;

%% Accuracy indicators
rmseMeas = sqrt(mean((Pmeas-Ptrue).^2));
rmseTwin = sqrt(mean((Ptwin-Ptrue).^2));

fprintf('Measurement RMSE = %.3f kW\n',rmseMeas);
fprintf('Twin RMSE        = %.3f kW\n',rmseTwin);
fprintf('Alarm samples    = %d\n',sum(alarm));

%% Main plot
figure;
plot(t,Ptrue,'LineWidth',1.6); hold on;
plot(t,Pmeas,'LineWidth',0.8);
plot(t,Ptwin,'LineWidth',1.6);
grid on;
xlabel('Time (s)');
ylabel('Active power (kW)');
title('Physical Feeder and Digital Twin');
legend('True power','Measurement','Digital twin',...
       'Location','best');

%% Residual plot
figure;
plot(t,residual,'LineWidth',1.2); hold on;
yline(threshold,'--');
yline(-threshold,'--');
scatter(t(alarm),residual(alarm),20,'filled');
grid on;
xlabel('Time (s)');
ylabel('Residual (kW)');
title('Residual-based Anomaly Detection');
legend('Residual','Upper threshold','Lower threshold','Alarm');
```

2. البرنامج الكامل

ينشئ البرنامج إشارة قدرة حقيقية وقياسات مشوشة، ثم يحدث حالة التوأم الرقمي في كل عينة، ويحسب البواقي ويولد إنذارًا عندما تتجاوز البواقي حدًا تكيفيًا.

3. Interpretation

- **Ptrue:** hidden physical-system state.
- **Pmeas:** noisy sensor stream.
- **Ptwin:** synchronized digital estimate.
- **Residual:** difference between measurement and twin.
- **Alarm:** samples that exceed the statistical threshold.

> A useful digital twin does not only visualize data; it continuously estimates, compares, predicts, and supports decisions.

3. تفسير النتائج

تمثل الإشارة الحقيقية النظام الفيزيائي، وتمثل القياسات بيانات الحساس، بينما تمثل Ptwin الحالة الرقمية المقدرة. ويشير تجاوز البواقي للحد إلى احتمال وجود شذوذ أو خطأ في النموذج.

4. Experiment A: Moving-Average Filter

```
window = 15;
Pfiltered = movmean(Pmeas,window);

figure;
plot(t,Pmeas,'LineWidth',0.7); hold on;
plot(t,Pfiltered,'LineWidth',1.7);
plot(t,Ptrue,'--','LineWidth',1.4);
grid on;
xlabel('Time (s)');
ylabel('Power (kW)');
title('Moving-Average Measurement Filter');
legend('Raw measurement','Filtered measurement','True signal');
```

Repeat the experiment using window sizes 5, 15, and 40. Larger windows reduce noise but increase delay.

4. التجربة A: المتوسط المتحرك

قارن نوافذ بأطوال مختلفة. تؤدي النافذة الكبيرة إلى تنعيم أفضل، لكنها تزيد التأخير وتضعف الاستجابة للتغيرات السريعة.

5. Experiment B: One-Step Prediction

```
Pforecast = zeros(size(t));
Pforecast(1:2) = Ptwin(1:2);

for k = 3:N
    slope = Ptwin(k-1)-Ptwin(k-2);
    Pforecast(k) = Ptwin(k-1)+slope;
end

forecastRMSE = sqrt(mean((Pforecast(3:end)-Ptrue(3:end)).^2));
fprintf('Forecast RMSE = %.3f kW\n',forecastRMSE);

figure;
plot(t,Ptrue,'LineWidth',1.5); hold on;
plot(t,Pforecast,'LineWidth',1.2);
grid on;
xlabel('Time (s)');
ylabel('Power (kW)');
title('One-Step Digital-Twin Forecast');
legend('True power','Forecast');
```

5. التجربة B: التنبؤ بخطوة واحدة

يستخدم التنبؤ اتجاه آخر عينتين من حالة التوأم لتقدير العينة التالية. قارن خطأ التنبؤ قبل الحالة غير الطبيعية وأثناءها.

6. Experiment C: Voltage Channel

```
Vtrue = 1.00 - 0.0015*(Ptrue-P0);
Vmeas = Vtrue + 0.003*randn(size(t));
Vtwin = zeros(size(t));
Vtwin(1) = Vmeas(1);

for k = 2:N
    Vtwin(k) = Vtwin(k-1) + 0.25*(Vmeas(k)-Vtwin(k-1));
end

figure;
plot(t,Vtrue,'LineWidth',1.5); hold on;
plot(t,Vmeas,'LineWidth',0.7);
plot(t,Vtwin,'LineWidth',1.5);
yline(0.95,'--','Lower limit');
grid on;
xlabel('Time (s)');
ylabel('Voltage (p.u.)');
title('Voltage Channel of the Digital Twin');
legend('True voltage','Measured voltage','Twin estimate');
```

6. التجربة C: قناة الجهد

أضف قناة جهد مرتبطة بقدرة الحمل، ثم راقب قدرة التوأم على تقدير الجهد واكتشاف الاقتراب من الحد الأدنى.

7. Experiment D: Missing Measurements

```
Pmissing = Pmeas;
Pmissing(400:450) = NaN;
PtwinMissing = zeros(size(t));
PtwinMissing(1) = Pmissing(1);

for k = 2:N
    prediction = PtwinMissing(k-1);
    if isnan(Pmissing(k))
        PtwinMissing(k) = prediction;
    else
        PtwinMissing(k) = prediction + ...
            alpha*(Pmissing(k)-prediction);
    end
end

figure;
plot(t,Ptrue,'LineWidth',1.5); hold on;
plot(t,PtwinMissing,'LineWidth',1.5);
xline(t(400),'--','Data loss starts');
xline(t(450),'--','Data returns');
grid on;
xlabel('Time (s)');
ylabel('Power (kW)');
title('Twin Operation during Missing Measurements');
```

During data loss, the twin relies only on its model. A weak model will drift if the outage is long.

7. التجربة D: فقدان القياسات

عند فقدان البيانات يعتمد التوأم على التنبؤ فقط. كلما طال الانقطاع، ازدادت أهمية جودة النموذج الفيزيائي.

8. Performance Metrics

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}(y_k - \hat{y}_k)^2}$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}, \qquad Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

```
trueAttack = false(size(t));
trueAttack(attackStart:attackEnd) = true;

TP = sum(alarm & trueAttack);
FP = sum(alarm & ~trueAttack);
FN = sum(~alarm & trueAttack);

precision = TP/max(TP+FP,1);
recall    = TP/max(TP+FN,1);

fprintf('Precision = %.3f\n',precision);
fprintf('Recall    = %.3f\n',recall);
```

8. مؤشرات الأداء

استخدم RMSE لتقييم دقة التقدير، والدقة والاستدعاء لتقييم جودة كشف الحالات غير الطبيعية.

9. Tasks

1. Change the correction gain α and explain the trade-off between speed and noise.
2. Use an adaptive threshold based on a moving standard deviation.
3. Add frequency and transformer-temperature channels.
4. Simulate sensor bias, drift, spikes, and packet loss.
5. Compare residual detection with an Isolation Forest or one-class SVM.
6. Estimate a model parameter online.
7. Create a dashboard showing current value, alarm state, RMSE, and forecast.

9. المهام

1. غيّر معامل التصحيح وناقش السرعة والضوضاء.
2. استخدم حدًا تكيفيًا يعتمد على انحراف معياري متحرك.
3. أضف قنوات التردد وحرارة المحول.
4. حاكي انحياز الحساس والانجراف والنبضات وفقدان الحزم.
5. قارن تحليل البواقي بخوارزمية تعلم آلي لكشف الشذوذ.
6. قدّر إحدى معلمات النموذج أثناء التشغيل.
7. أنشئ لوحة تعرض الحالة والإنذار والخطأ والتنبؤ.

10. Mini Project

Develop a digital twin for a distribution transformer. Use current, ambient temperature, and a first-order thermal model to estimate winding temperature. Add an AI residual-correction model, detect overheating, and estimate the time remaining before a thermal limit is reached.

10. المشروع المصغر

طوّر توأمًا رقميًا لمحول توزيع باستخدام التيار ودرجة حرارة الجو ونموذج حراري من الدرجة الأولى. أضف تصحيحًا بالذكاء الاصطناعي وكشفًا لارتفاع الحرارة وتقديرًا للزمن المتبقي قبل بلوغ الحد الحراري.