บทที่ 4

วิธีทดสอบและผลการทดสอบทฤษฎี

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีทดสอบและผลการทดสอบทฤษฎีที่เกี่ยวกับการแกว่งและขอบเขตของการแกว่งดังที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 โครงสร้างของบทนี้แบ่งออกเป็น 4 ส่วนคือ

1. แสดงถึงวิธีการจำลองแบบระบบด้วยคอมพิวเตอร์และโครงสร้างของโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองแบบ
2. แสดงถึงปัญหาตัวอย่างในการออกแบบระบบควบคุมต่อเนื่องเชิงเวลาแบบปรับเปลี่ยนโครงสร้างของตัวควบคุมได้
3. แสดงถึงเมตริกซ์ที่จำเป็นต่อการหาค่าขอบเขตการแกว่งเมื่อแปลงระบบควบคุมต่อเนื่องเชิงเวลาเป็นระบบควบคุมไม่ต่อเนื่องเชิงเวลา
4. แสดงถึงผลการจำลองแบบระบบด้วยคอมพิวเตอร์ทั้งการจำลองแบบตัวควบคุมเป็นแบบแอนะล็อกและดิจิทัลรวมทั้งขอบเขตการแกว่งของระบบควบคุมไม่ต่อเนื่องเชิงเวลาแบบปรับเปลี่ยนโครงสร้างของตัวควบคุมได้

วิธีการจำลองแบบระบบด้วยคอมพิวเตอร์และโครงสร้างของโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองแบบ

โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองแบบระบบแบ่งเป็นสองส่วนใหญ่ๆคือส่วนที่ทำการคำนวณและส่วนที่แสดงผลทางด้านกราฟฟิก โดยทั้งสองส่วนทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์คนละชนิดและเชื่อมโยงกันด้วยวิธีการเขียนข้อมูลในส่วนที่ต้องการแสดงผลเป็นกราฟฟิกลงในแฟ้มข้อมูลที่ส่วนแสดงผลสามารถนำไปใช้ได้

ในส่วนของการคำนวณใช้ตัวแปรภาษา C ชื่อ GNU C ซึ่งเป็นตัวแปรภาษาที่อยู่ในเครื่องคอมพิวเตอร์ Sun และ Hewlett Packard โดยตัวแปรภาษาดังกล่าวทำงานภายใต้โปรแกรมจัดการระบบ UNIX เครื่องคอมพิวเตอร์ดังกล่าวอยู่ในศูนย์คอมพิวเตอร์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ส่วนภาคแสดงผลกราฟฟิกใช้ตัวแปรภาษา C ชื่อ Turbo C และ Borland C++ ซึ่งทำงานภายใต้โปรแกรมจัดการระบบ DOS

โปรแกรมในส่วนที่ใช้คำนวณเพื่อแก้สมการเชิงอนุพันธ์ใช้วิธีการของ Runge-Kutta อันดับที่ 4 เนื่องจากโปรแกรมในส่วนที่ใช้จำลองแบบตัวควบคุมไม่ต่อเนื่องเชิงเวลาเป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรมที่ใช้แก้สมการเชิงอนุพันธ์ ดังนั้นเวลาชักตัวอย่างที่ใช้ได้ในโปรแกรมนี้ต้องเป็นจำนวนเท่าของขั้นในการอินทีเกรตเพื่อแก้สมการเชิงอนุพันธ์ นอกจากนั้นในโปรแกรมทั้งสองใช้การจัดสรรตัวแปรส่วนใหญ่แบบพลวัต (Dynamic allocation)

ปัญหาตัวอย่างในการออกแบบระบบควบคุมต่อเนื่องเชิงเวลาแบบปรับเปลี่ยนโครงสร้างของตัวควบคุมได้

ตัวอย่างที่ 1 ใช้ระบบอันดับสามดังนี้คือ

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -2 & -3 \end{bmatrix} . \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} . \mathbf{u} \qquad (4\text{-}1)$$

กำหนดเมตริกซ์ **c** ที่เป็นตัวกำหนดผลตอบสุดท้ายของระบบมีค่าเป็น

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} 12 \\ 5 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{4-2}$$

ดังนั้นเมตริกซ์ **k** ที่ทำให้ระบบมีผลตอบตามต้องการจะเท่ากับ

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} -24 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{4-3}$$

จากสมการที่ (4-3) ทำให้ระบบมีค่าเจาะจงที่สัมพันธ์กับปริภูมิว่างสองตัวคือ

$\lambda_1 = -2.5 + j2.4$ และ

$\lambda_2 = -2.5 - j2.4$

และค่าเจาะจงตัวสุดท้าย (λ_3 หรือ λ_n) จะมีค่าเป็น

$\lambda_3 = 2$

กำหนดให้สัญญาณควบคุมแบบสวิตชิงมีการเปลี่ยนแปลงค่าเฉพาะส่วนที่เกี่ยวข้องกับสเตท x_1 เท่านั้น ดังนั้นจะได้ว่า

$$\Delta\mathbf{k} = \begin{bmatrix} \Delta k_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{4-4}$$

ใช้อสมการที่ (2-31) ได้ว่า

$$2.c_i - c_{i-1} < 0 \qquad ; i=2,3 \tag{4-5}$$

จากอสมการที่ (4-5) แทนค่า i=2 ได้ว่า

$$2.c_2 - c_1 < 0$$
$$10-12 < 0$$
$$-2 < 0$$

แสดงว่าอสมการในกรณีนี้เป็นจริง

จากอสมการที่ (4-5) แทนค่า i=3 ได้ว่า

$$2.c_3 - c_2 < 0$$
$$2-5 < 0$$
$$-3 < 0$$

แสดงว่าอสมการในกรณีนี้เป็นจริง

ดังนั้นค่าเมตริกซ์ **c** ที่กำหนดในตอนต้นสามารถทำให้เกิดภาวะการเข้าถึงได้จากสมการที่ (2-32)

$$\Delta k_i = \alpha_i . \mathrm{sgn}(s.x_i) \qquad \text{เมื่อ} \qquad \alpha_i > \lambda_n . c_i$$

ดังนั้น

$$\alpha_1 > \lambda_3 . c_1$$

$$\alpha_1 > 24 \qquad (4\text{-}6)$$

จากอสมการที่ (4-6) กำหนดให้ $\alpha_1 = 100$

เขียนเมตริกซ์ $\Delta \mathbf{k}$ ใหม่ได้ว่า

$$\Delta \mathbf{k} = \begin{bmatrix} 100 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad \text{เมื่อ} \quad s.x_1 > 0 \qquad (4\text{-}7)$$

และ

$$\Delta \mathbf{k} = \begin{bmatrix} -100 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad \text{เมื่อ} \quad s.x_1 < 0 \qquad (4\text{-}8)$$

กล่าวโดยสรุป สัญญาณควบคุมที่ใช้ในการควบคุมระบบดังสมการที่ (4-1) เพื่อให้มีผลตอบดังสมการ

$$\mathbf{c}'.\mathbf{x} = 0 \qquad (4\text{-}9)$$

หรือ

$$c_1.x_1 + c_2.x_2 + c_3.x_3 = 0$$
$$c_1.x_1 + c_2.\dot{x}_1 + c_3.\ddot{x}_1 = 0$$
$$\ddot{x}_1 + 5.\dot{x}_1 + 12.x_1 = 0 \qquad (4\text{-}10)$$

คือ

$$u = -\left(\begin{bmatrix} -24 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}' + \begin{bmatrix} 100.\mathrm{sgn}(s.x_1) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}' \right) . \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \qquad (4\text{-}11)$$

ตัวอย่างที่ 2 ใช้ระบบอันดับสี่ดังนี้คือ

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -9 & -21 & -16 & -3 \end{bmatrix} . x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} . u \qquad (4\text{-}12)$$

กำหนดเมตริกซ์ **c** ที่เป็นตัวกำหนดผลตอบสุดท้ายของระบบมีค่าเป็น

$$c = \begin{bmatrix} 5 \\ 9 \\ 5 \\ 1 \end{bmatrix} \qquad (4\text{-}13)$$

ดังนั้นเมตริกซ์ **k** ที่ทำให้ระบบมีผลตอบตามต้องการจะเท่ากับ

$$k = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{bmatrix} \qquad (4\text{-}14)$$

จากสมการที่ (4-14) ทำให้ระบบมีค่าเจาะจงที่สัมพันธ์กับปริภูมิว่างสามตัวคือ

$\lambda_1 = -2+j$

$\lambda_2 = -2-j$ และ

$\lambda_3 = -1$

และค่าเจาะจงตัวสุดท้าย (λ_4 และ λ_n) จะมีค่าเป็น

$\lambda_4 = -2$

กำหนดให้สัญญาณควบคุมแบบสวิตช์ชิงมีการเปลี่ยนแปลงค่าเฉพาะส่วนที่เกี่ยวข้องกับสเตท x_1 เท่านั้น ดังนั้นจะได้ว่า

$$\Delta k = \begin{bmatrix} \Delta k_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (4\text{-}15)$$

เนื่องจากระบบนี้มีค่าเจาะจงตัวสุดท้าย (λ_n) เป็นลบหรือมีเสถียรภาพนั่นเอง ดังนั้นจากอสมการที่ (2-25) แสดงให้เห็นว่าระบบนี้จะเกิดสภาวะการเข้าถึงเมื่อค่า $\alpha_1 > 0$ ดังนั้นเลือก $\alpha_1 = 100$

เขียนเมตริกซ์ Δk ใหม่ได้ว่า

$$\Delta\mathbf{k} = \begin{bmatrix} 100 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad \text{เมื่อ} \quad s.x_1 > 0 \tag{4-16}$$

และ

$$\Delta\mathbf{k} = \begin{bmatrix} -100 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad \text{เมื่อ} \quad s.x_1 < 0 \tag{4-17}$$

กล่าวโดยสรุป สัญญาณควบคุมที่ใช้ในการควบคุมระบบดังสมการที่ (4-12) เพื่อให้มีผลตอบดังสมการ

$$\mathbf{c}'.\mathbf{x} = 0 \tag{4-18}$$

หรือ

$$\begin{aligned} c_1.x_1 + c_2.x_2 + c_3.x_3 + c_4.x_4 &= 0 \\ 5.x_1 + 9.x_2 + 5.x_3 + x_4 &= 0 \\ \dddot{x}_1 + 5.\ddot{x}_1 + 9.\dot{x}_1 + 5.x_1 &= 0 \end{aligned} \tag{4-19}$$

คือ

$$\mathbf{u} = -\left(\begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{bmatrix}' + \begin{bmatrix} 100\,\mathrm{sgn}(s.x_1) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}'\right).\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \tag{4-20}$$

เมตริกซ์ที่จำเป็นต่อการหาค่าขอบเขตการแกว่ง

จากสมการที่ (3-2) และ (3-3) หาเมตริกซ์ **M**(T) จากโปรแกรม Mathematica ได้ที่ค่าเวลาชักตัวอย่างเท่ากับ 0.01 หรือ 0.005 หรือ 0.001 และค่าของเมตริกซ์ **L** ได้ดังนี้คือ

จากตัวอย่างที่ 1 ตามสมการที่ (4-1) และ สมการที่ (4-11) สามารถเขียนเมตริกซ์ **M**(T) เมื่อ T = 0.01 ได้ว่า

$$\mathbf{M}(T) = e^{\mathbf{L}0.01} \tag{4-21}$$

เมื่อ **L** เป็นเมตริกซ์ที่มีสองค่าคือ

1. กรณีที่ $\Delta k_1 = 100$

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -76 & -2 & -3 \end{bmatrix} \tag{4-22}$$

ทำให้

$$M(0.01) = \begin{bmatrix} 0.999987 & 0.010000 & 0.000050 \\ -0.003762 & 0.999888 & 0.009851 \\ -0.748686 & -0.023464 & 0.970335 \end{bmatrix} \tag{4-23}$$

2. กรณีที่ $\Delta k_1 = -100$

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 124 & -2 & -3 \end{bmatrix} \tag{4-24}$$

ทำให้

$$M(0.01) = \begin{bmatrix} 1.000021 & 0.010000 & 0.000050 \\ 0.006138 & 0.999922 & 0.009851 \\ 1.221550 & -0.013564 & 0.970368 \end{bmatrix} \tag{4-25}$$

เมื่อ T = 0.005

1. กรณีที่ $\Delta k_1 = 100$

$$M(0.005) = \begin{bmatrix} 0.999998 & 0.005000 & 0.000013 \\ -0.000945 & 0.999974 & 0.004963 \\ -0.377161 & -0.010871 & 0.985086 \end{bmatrix} \tag{4-26}$$

2. กรณีที่ $\Delta k_1 = -100$

$$M(0.005) = \begin{bmatrix} 1.000003 & 0.005000 & 0.000012 \\ 0.001542 & 0.999978 & 0.004963 \\ 0.615368 & -0.008383 & 0.985090 \end{bmatrix} \tag{4-27}$$

เมื่อ T = 0.001

1. กรณีที่ $\Delta k_1 = 100$

$$M(0.001) = \begin{bmatrix} 1.000000 & 0.001000 & 0.000000 \\ -0.000038 & 0.999999 & 0.000999 \\ -0.075886 & -0.002035 & 0.997003 \end{bmatrix} \tag{4-28}$$

2. กรณีที่ $\Delta k_1 = -100$

$$\mathbf{M}(0.001) = \begin{bmatrix} 1.000000 & 0.001000 & 0.000000 \\ 0.000062 & 0.999999 & 0.000999 \\ 0.123814 & -0.001935 & 0.997004 \end{bmatrix} \quad (4\text{-}29)$$

จากสมการที่ (3-2) และ (3-3) หาเมตริกซ์ **M**(T) จากโปรแกรม Mathematica ได้ที่ค่าเวลาชักตัวอย่างเท่ากับ 0.05 หรือ 0.01 หรือ 0.005 และค่าของเมตริกซ์ **L** ได้ดังนี้คือ

จากตัวอย่างที่ 2 ตามสมการที่ (4-12) และสมการที่ (4-20) สามารถเขียนเมตริกซ์ **M**(T) เมื่อ T = 0.05 ได้ว่า

$$\mathbf{M}(\mathrm{T}) = e^{\mathbf{L}0.05} \quad (4\text{-}30)$$

เมื่อ **L** เป็นเมตริกซ์ที่มีสองค่าคือ

1. กรณีที่ $\Delta k_1 = 100$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -110 & -23 & -19 & -7 \end{bmatrix} \quad (4\text{-}31)$$

ทำให้

$$\mathbf{M}(0.05) = \begin{bmatrix} 0.999973 & 0.049994 & 0.001245 & 0.000019 \\ -0.002100 & 0.999534 & 0.049631 & 0.001112 \\ -0.122290 & -0.027669 & 0.978412 & 0.041849 \\ -4.603439 & -1.084827 & -0.822809 & 0.685465 \end{bmatrix} \quad (4\text{-}32)$$

2. กรณีที่ $\Delta k_1 = -100$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 90 & -23 & -19 & -7 \end{bmatrix} \quad (4\text{-}33)$$

ทำให้

$$\mathbf{M}(0.05) = \begin{bmatrix} 1.000022 & 0.049995 & 0.001245 & 0.000019 \\ 0.001718 & 0.999583 & 0.049632 & 0.001112 \\ 0.100055 & -0.023852 & 0.978460 & 0.041850 \\ 3.766492 & -0.862492 & -0.819000 & 0.685511 \end{bmatrix} \quad (4\text{-}34)$$

เมื่อ T = 0.01

1. กรณีที่ $\Delta k_1 = 100$

$$\mathbf{M}(0.01) = \begin{bmatrix} 1.000000 & 0.010000 & 0.000050 & 0.000000 \\ -0.000018 & 0.999996 & 0.009997 & 0.000049 \\ -0.005373 & -0.001141 & 0.999068 & 0.009655 \\ -1.062045 & -0.227437 & -0.184586 & 0.931483 \end{bmatrix} \quad (4\text{-}35)$$

2. กรณีที่ $\Delta k_1 = -100$

$$\mathbf{M}(0.01) = \begin{bmatrix} 1.000000 & 0.010000 & 0.000050 & 0.000000 \\ 0.000015 & 0.999996 & 0.009997 & 0.000049 \\ 0.004396 & -0.001109 & 0.999068 & 0.009655 \\ 0.868946 & -0.217668 & -0.184552 & 0.931483 \end{bmatrix} \quad (4\text{-}36)$$

เมื่อ T = 0.005

1. กรณีที่ $\Delta k_1 = 100$

$$\mathbf{M}(0.005) = \begin{bmatrix} 1.000000 & 0.005000 & 0.000012 & 0.000000 \\ -0.000002 & 1.000000 & 0.005000 & 0.000012 \\ -0.001359 & -0.000286 & 0.999765 & 0.004913 \\ -0.540443 & -0.114361 & -0.093636 & 0.965373 \end{bmatrix} \quad (4\text{-}37)$$

2. กรณีที่ $\Delta k_1 = -100$

$$\mathbf{M}(0.005) = \begin{bmatrix} 1.000000 & 0.005000 & 0.000013 & 0.000000 \\ 0.000002 & 1.0000000 & 0.005000 & 0.000012 \\ 0.001112 & -0.000282 & 0.999765 & 0.004913 \\ 0.442181 & -0.111890 & -0.093632 & 0.965373 \end{bmatrix} \quad (4\text{-}38)$$

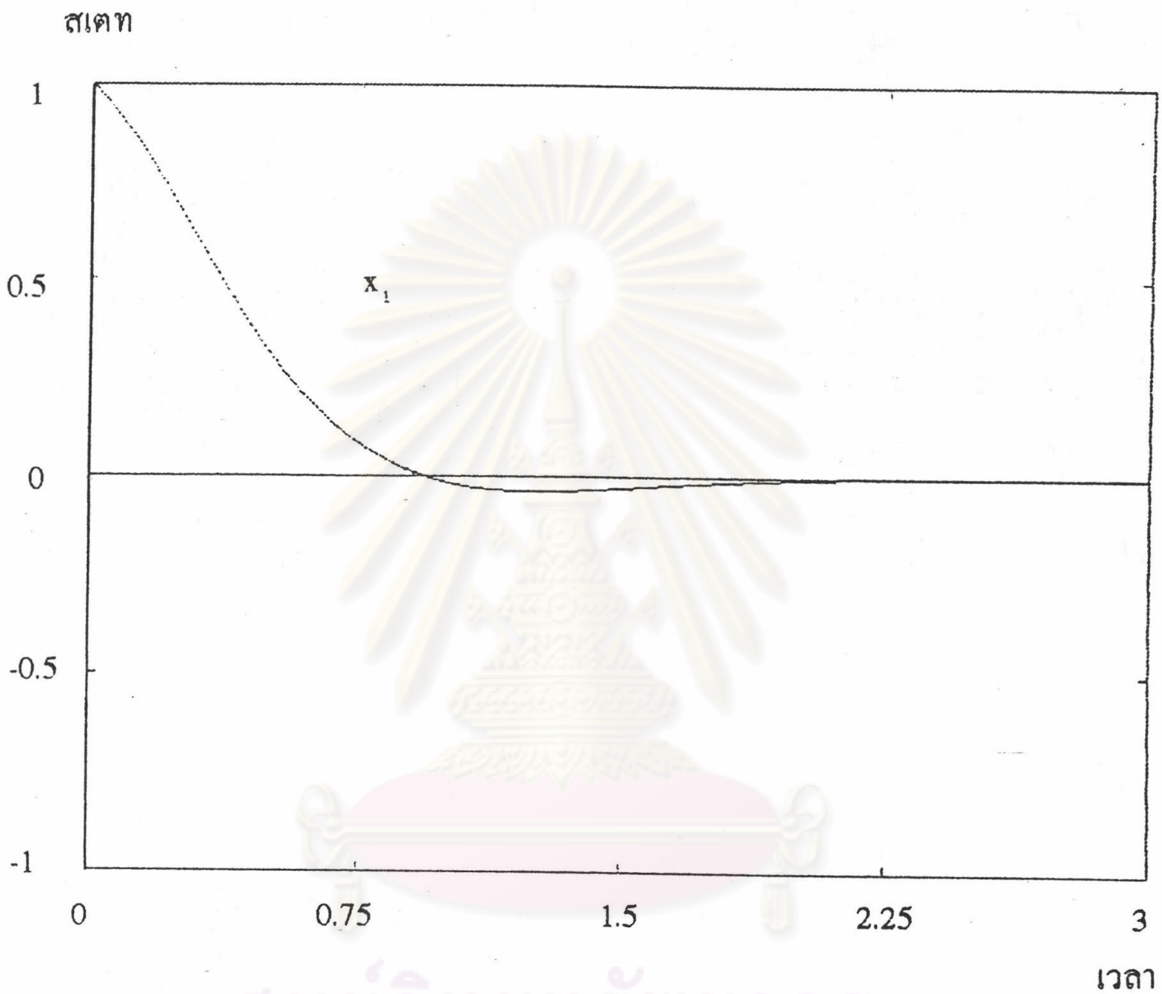
ผลการจำลองแบบระบบด้วยคอมพิวเตอร์

จากระบบควบคุมดังตัวอย่างที่ 1 ตามสมการที่ (4-1) และสมการที่ (4-11) และกำหนดสเตทเริ่มต้นเป็น

$$\mathbf{x}_{init} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

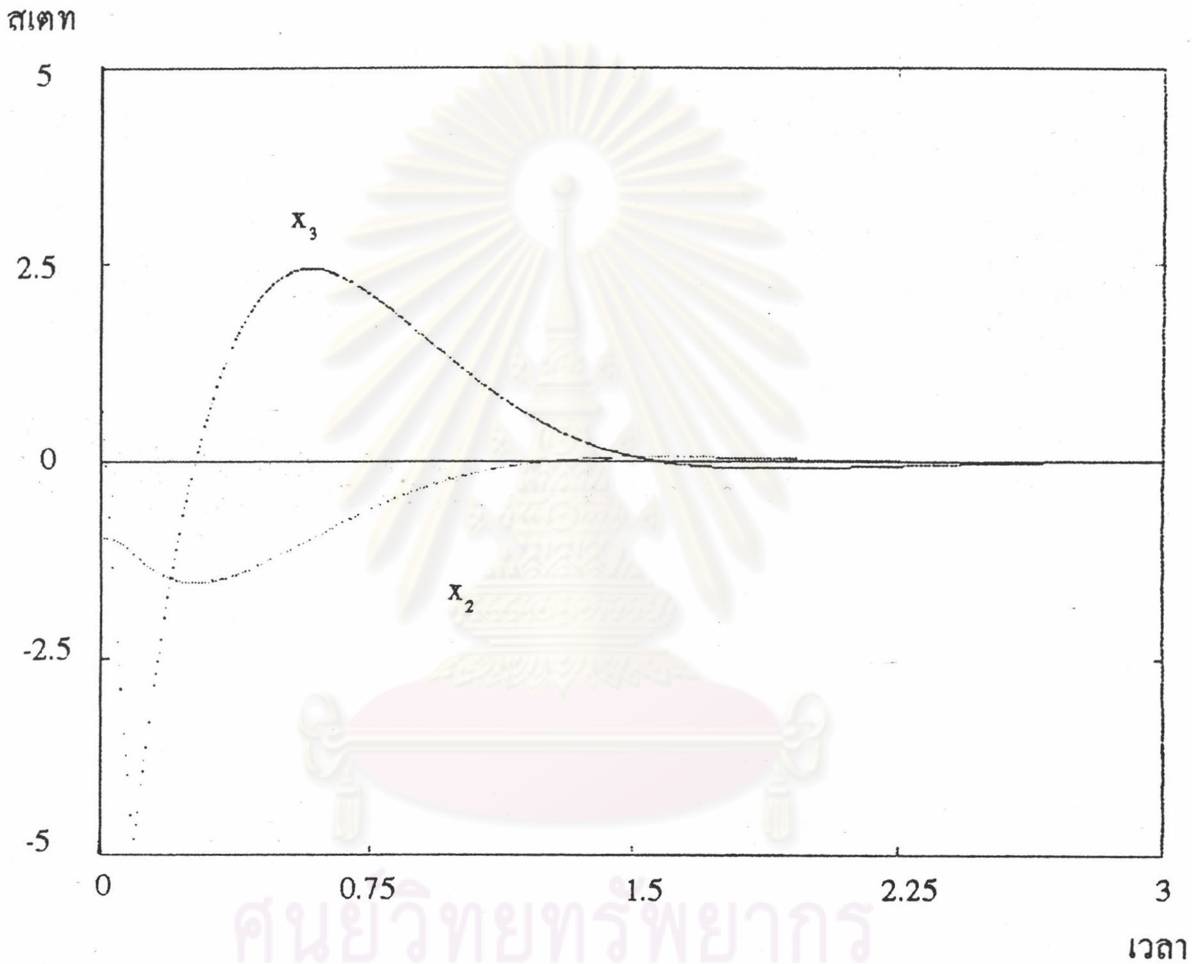
เมื่อจำลองแบบระบบได้ผลดังรูปต่างๆต่อไปนี้

ระบบในโดเมนเวลาต่อเนื่อง

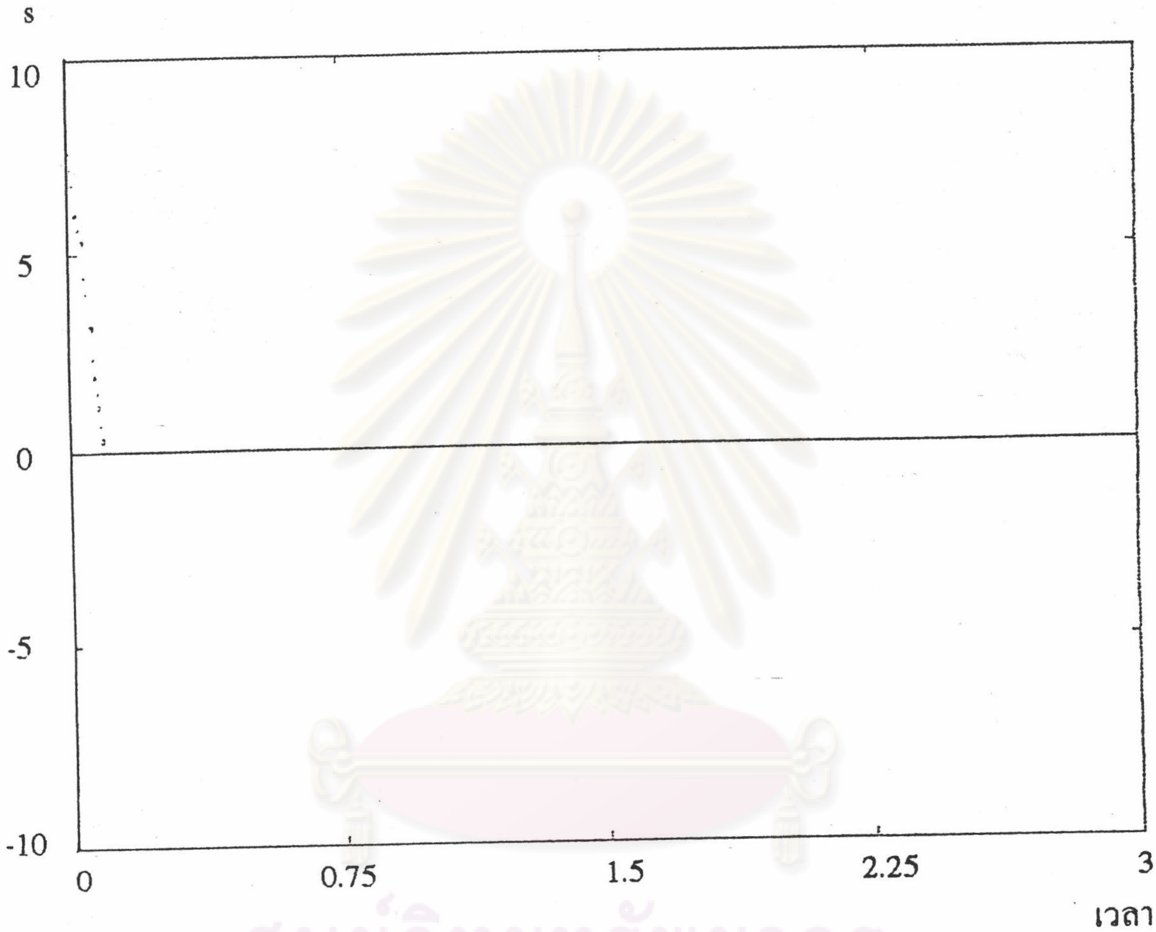


รูปที่ 4-1 กราฟระหว่างสเตท x_1 กับเวลา (ตัวอย่างที่ 1)

จากรูปที่ 4-1 แสดงให้เห็นว่าสเตท x_1 มีผลตอบตามสมการที่ (4-10)

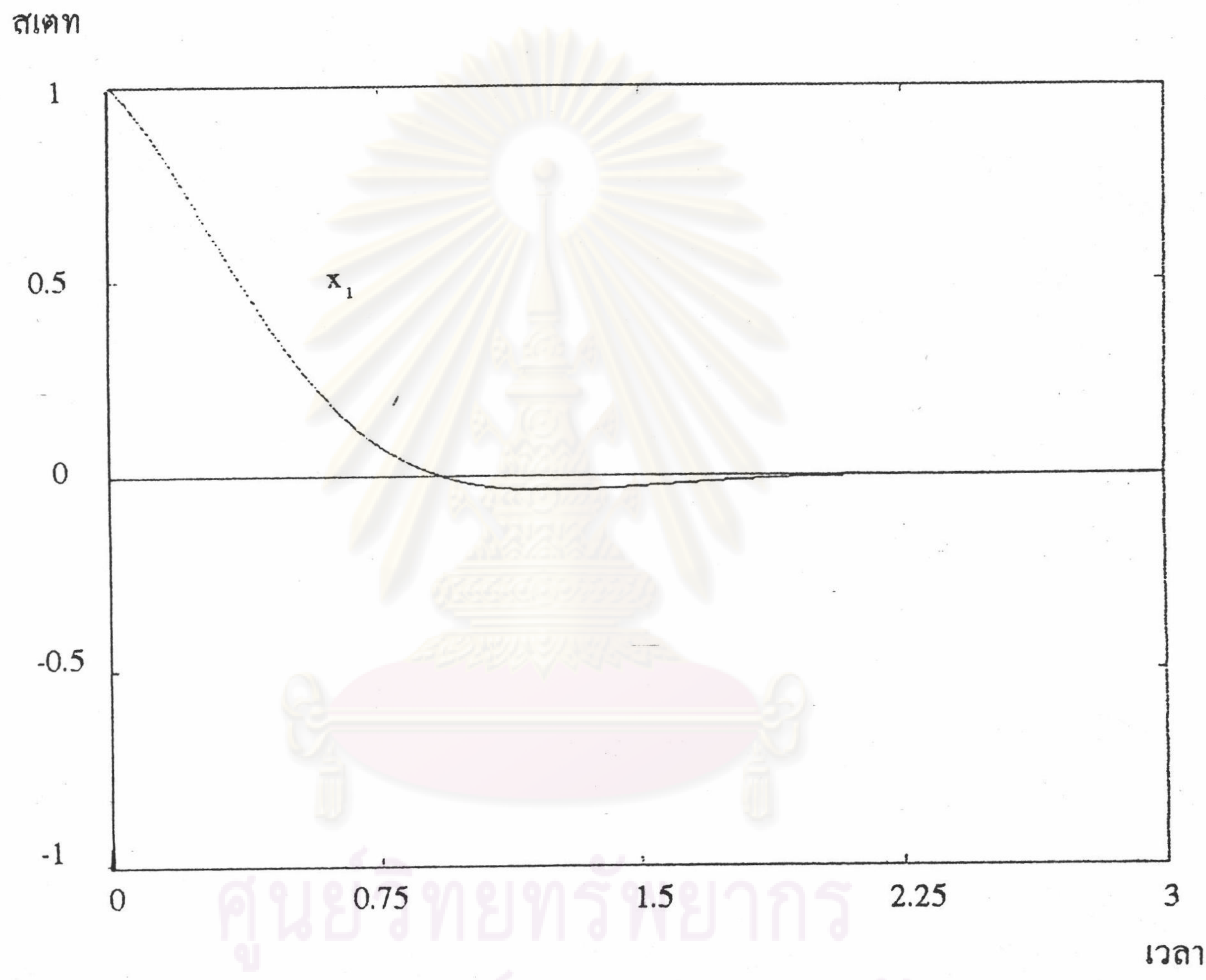


รูปที่ 4-2 กราฟระหว่างสเตท x_2 และ x_3 กับเวลา (ตัวอย่างที่ 1)

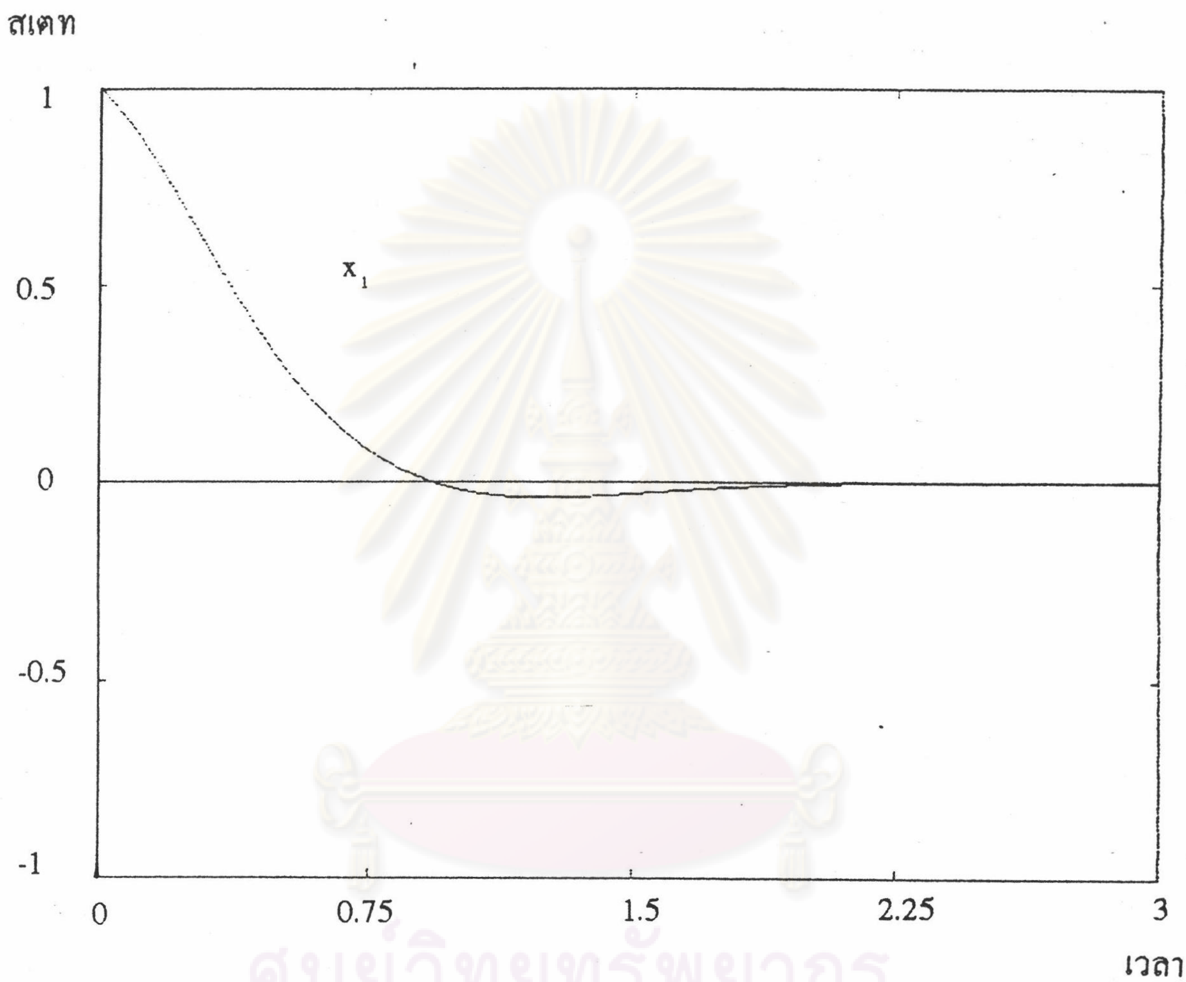


รูปที่ 4-3 กราฟระหว่างค่าสวิตชิงฟังก์ชัน (s) กับเวลา (ตัวอย่างที่ 1)

เมื่อแปลงระบบเป็นระบบควบคุมไม่ต่อเนื่องเชิงเวลาแบบปรับเปลี่ยนโครงสร้างของตัวควบคุมได้และใช้เวลาชักตัวอย่างค่าต่างๆกันได้ผลดังรูป

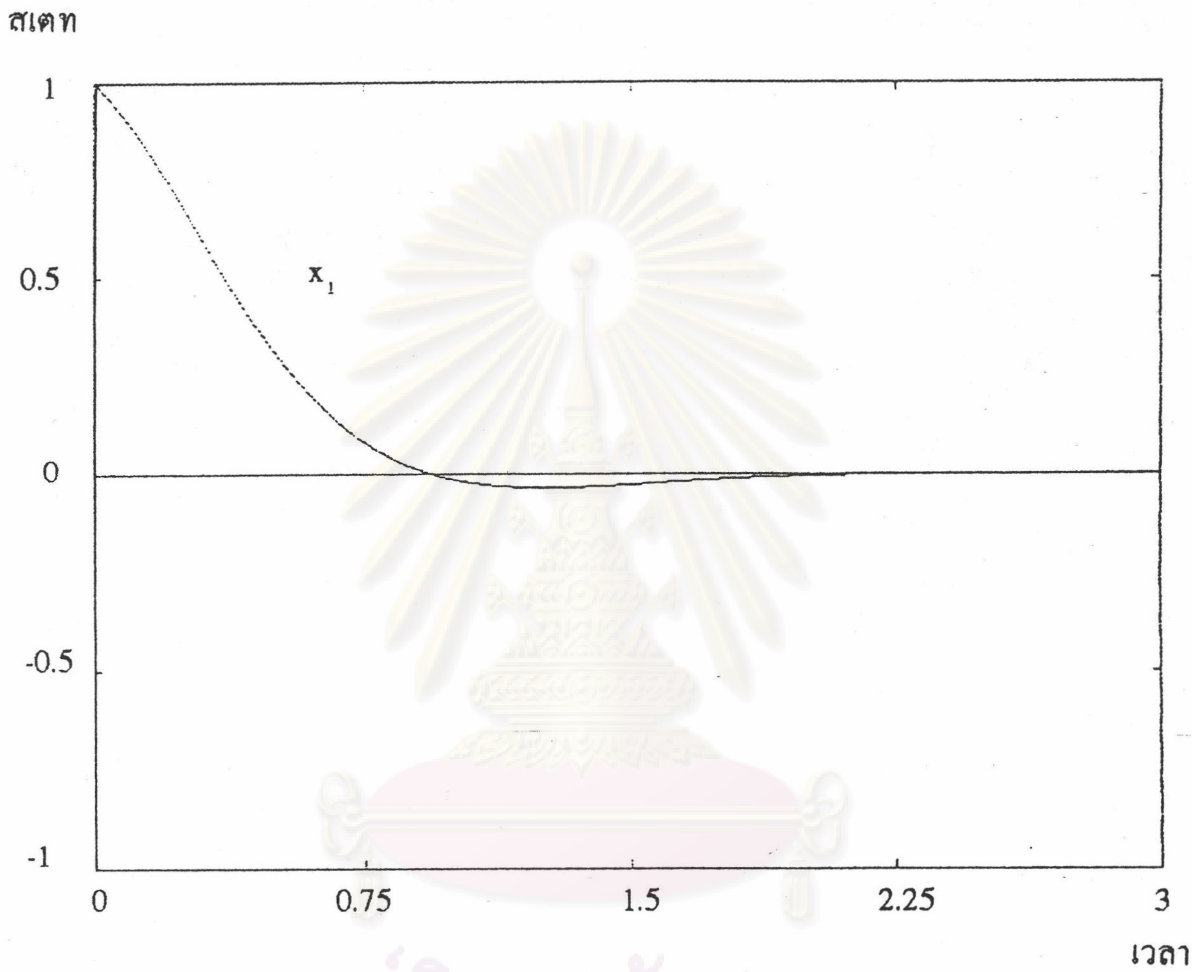


รูปที่ 4-4 กราฟระหว่างสเตท x_1 กับเวลา (ตัวอย่างที่ 1) กรณีที่เวลาชักตัวอย่างเท่ากับ 0.01

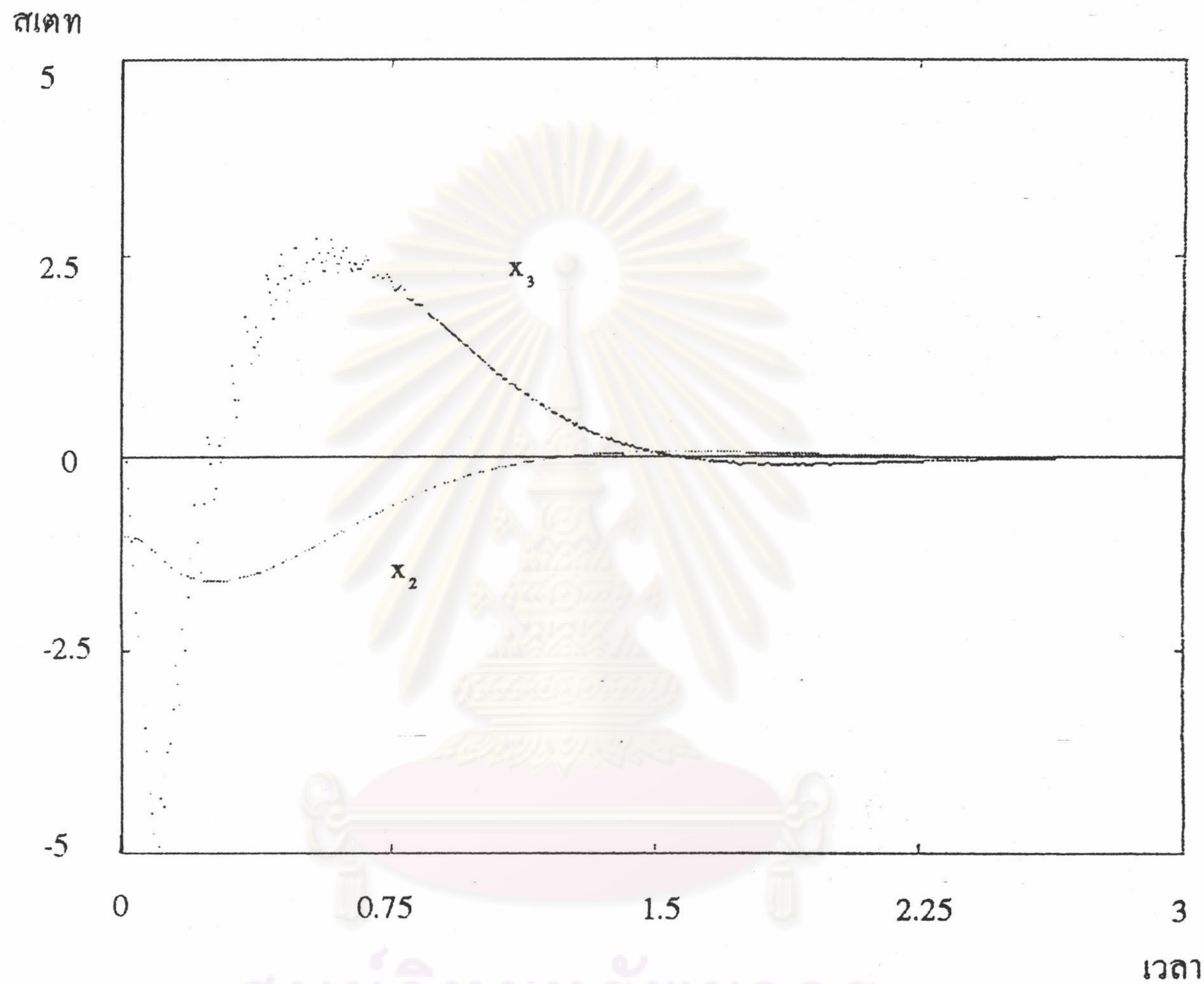


รูปที่ 4-5 กราฟระหว่างสเตท x_1 กับเวลา (ตัวอย่างที่ 1)

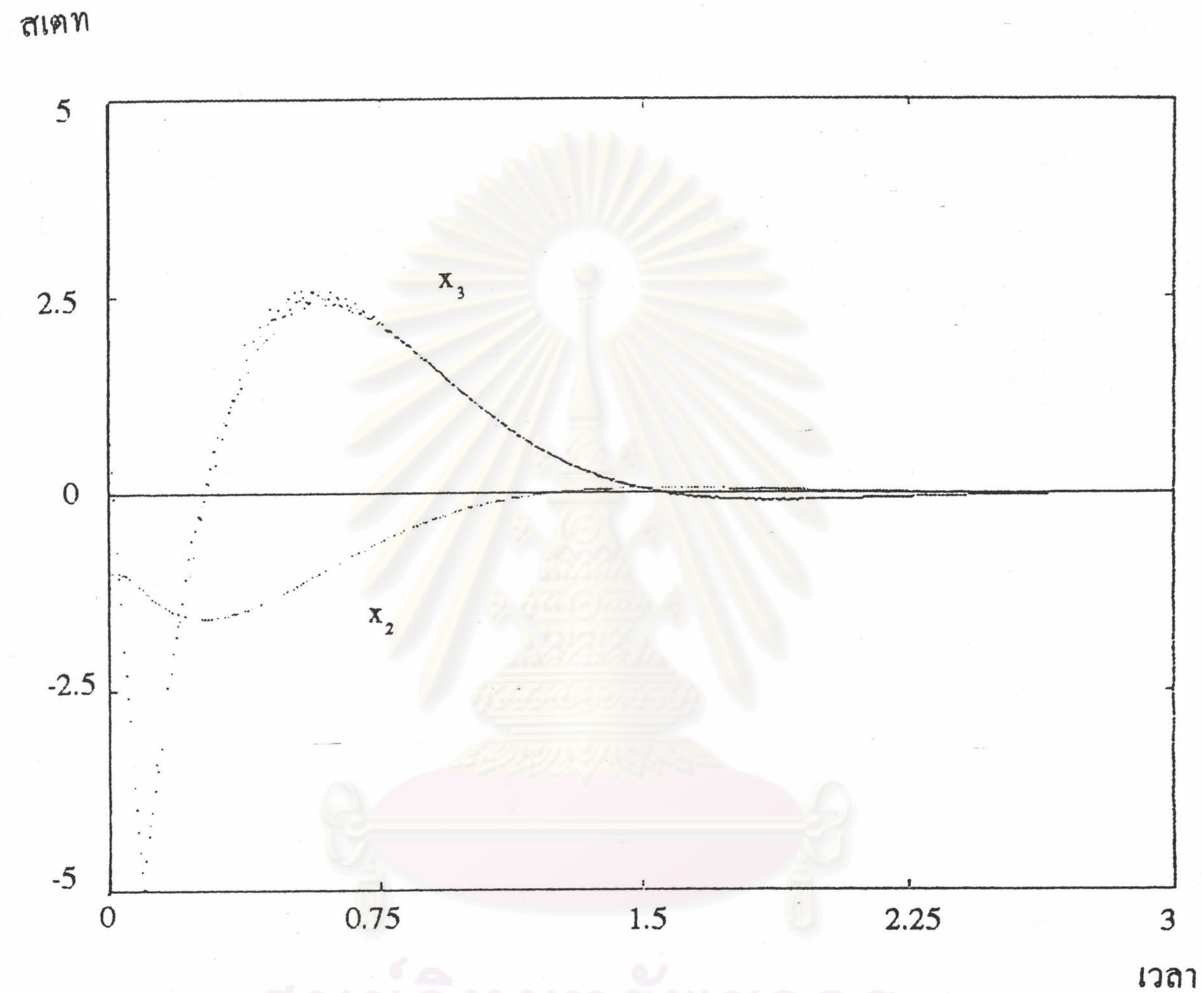
กรณีที่เวลาชักตัวอย่างเท่ากับ 0.005



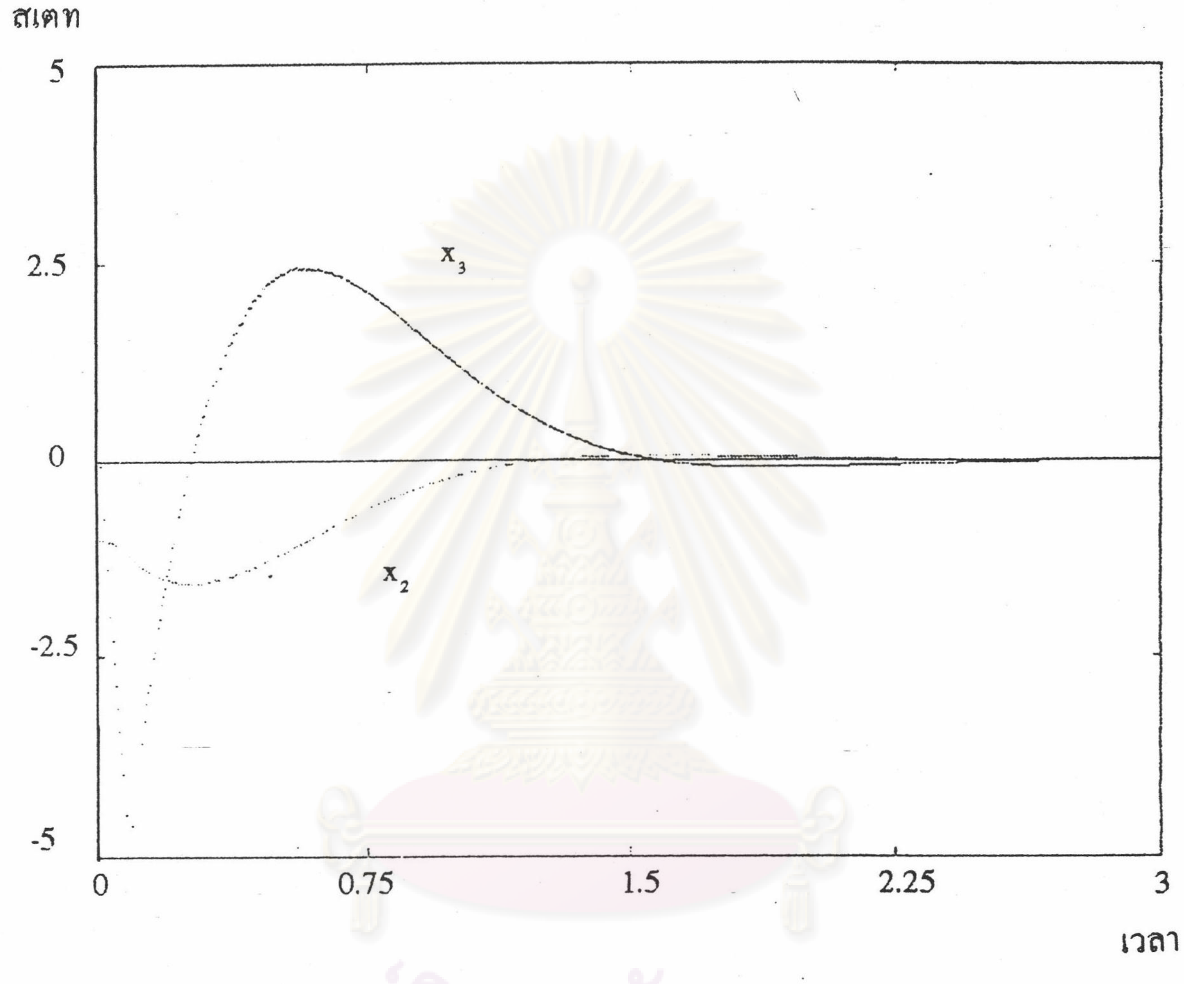
รูปที่ 4-6 กราฟระหว่างสเตท x_1 กับเวลา (ตัวอย่างที่ 1)
กรณีที่เวลาชักตัวอย่างเท่ากับ 0.001



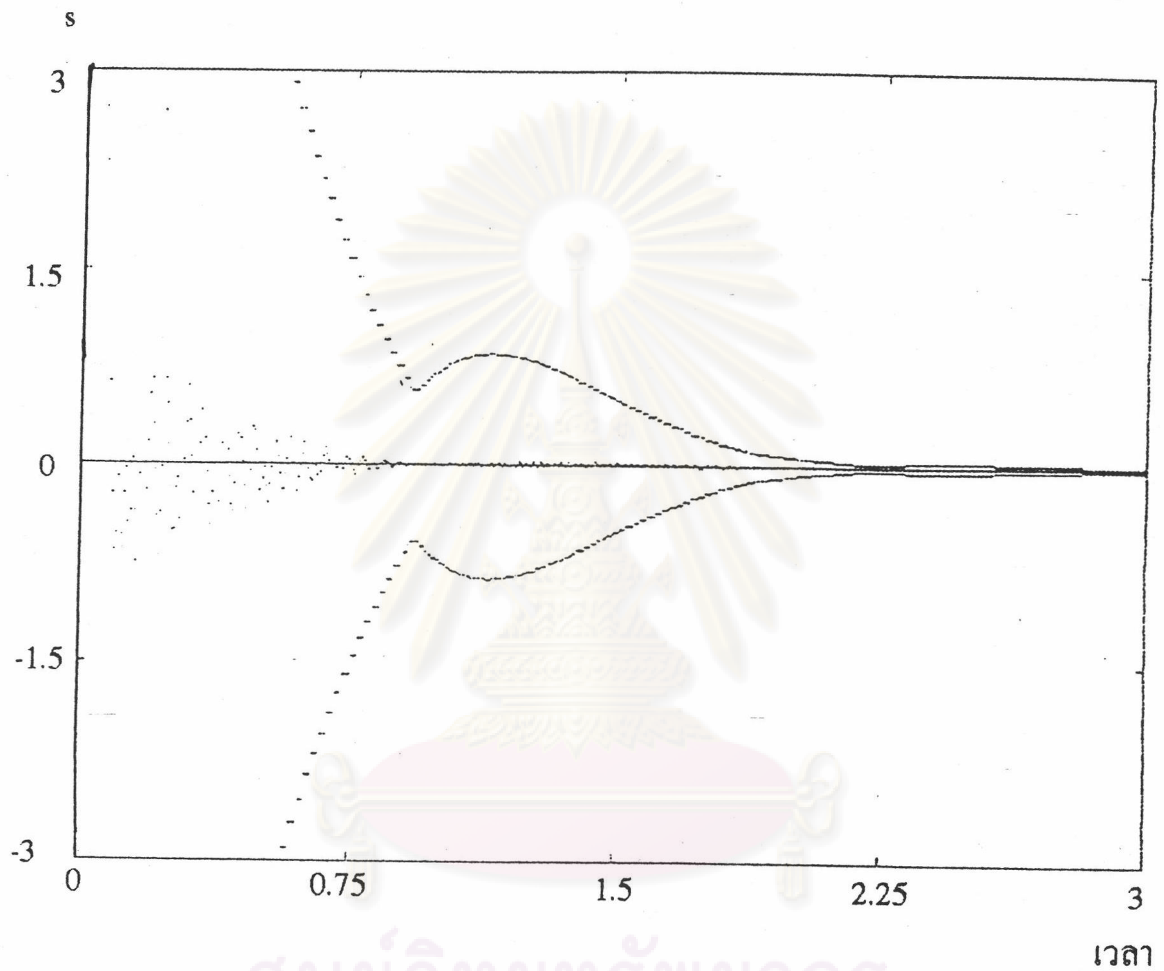
รูปที่ 4-7 กราฟระหว่างสเตท x_2 และ x_3 กับเวลา (ตัวอย่างที่ 1)
กรณีที่เวลาชักตัวอย่างเท่ากับ 0.01



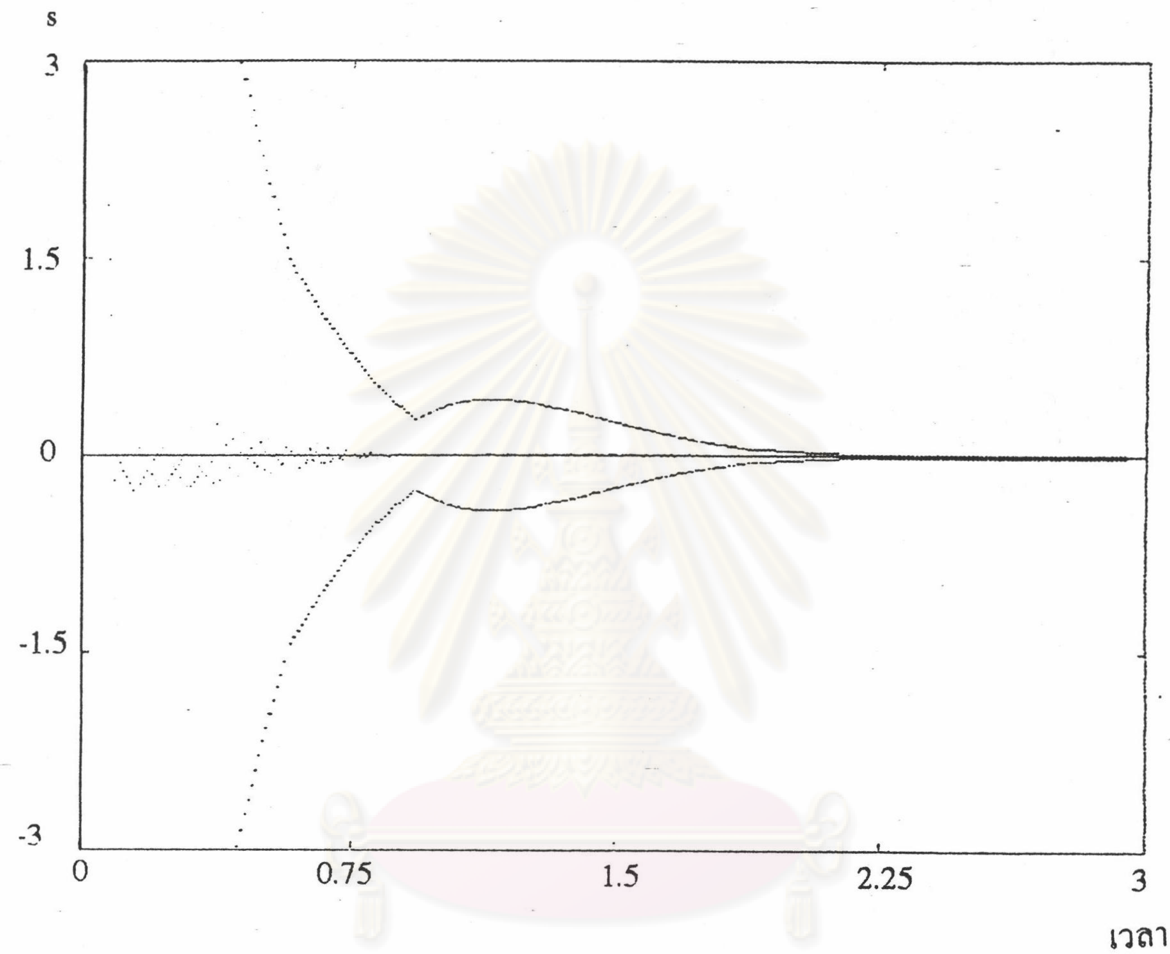
รูปที่ 4-8 กราฟระหว่างสเตท x_2 และ x_3 กับเวลา (ตัวอย่างที่ 1)
กรณีที่เวลาชักตัวอย่างเท่ากับ 0.005



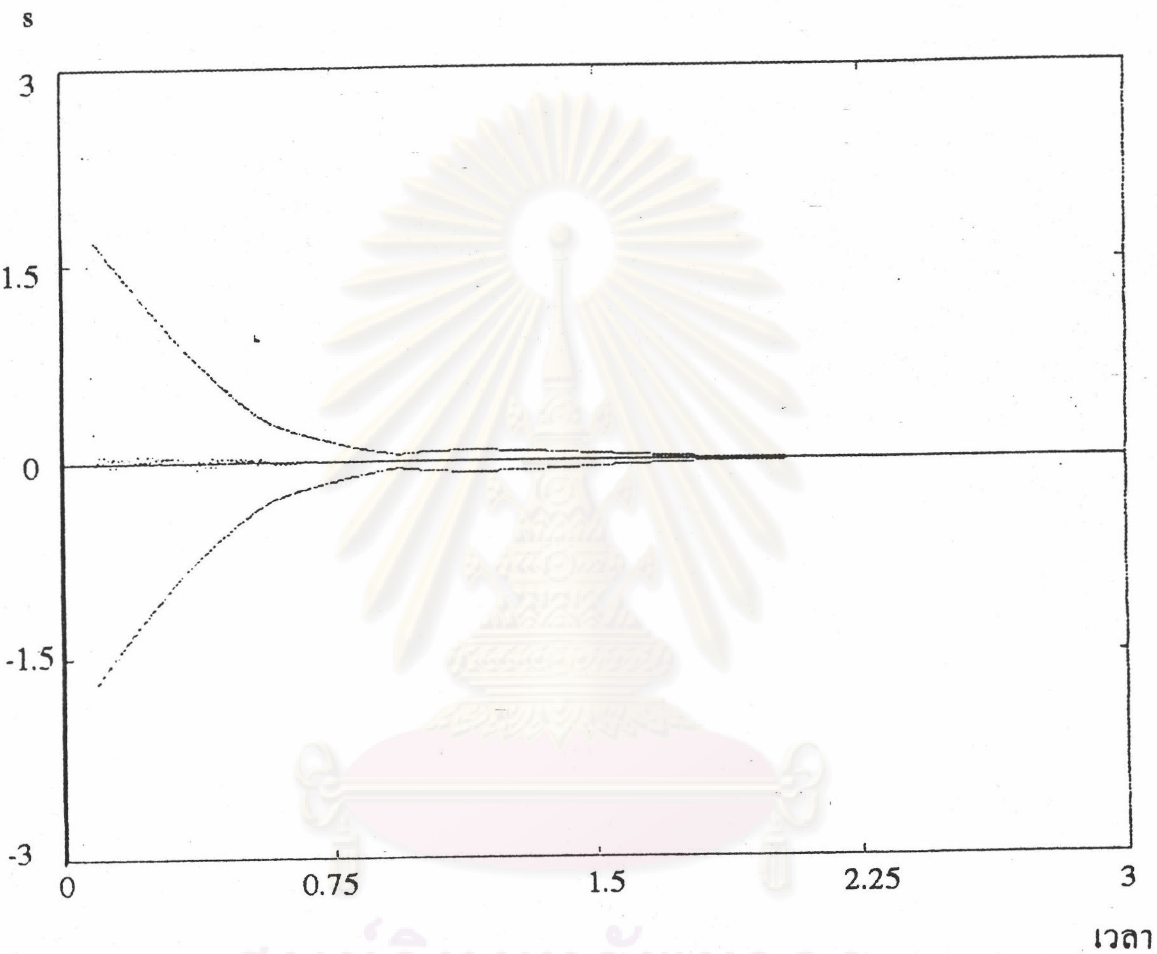
รูปที่ 4-9 กราฟระหว่างสเตท x_2 และ x_3 กับเวลา (ตัวอย่างที่ 1)
กรณีที่เวลาชักตัวอย่างเท่ากับ 0.001



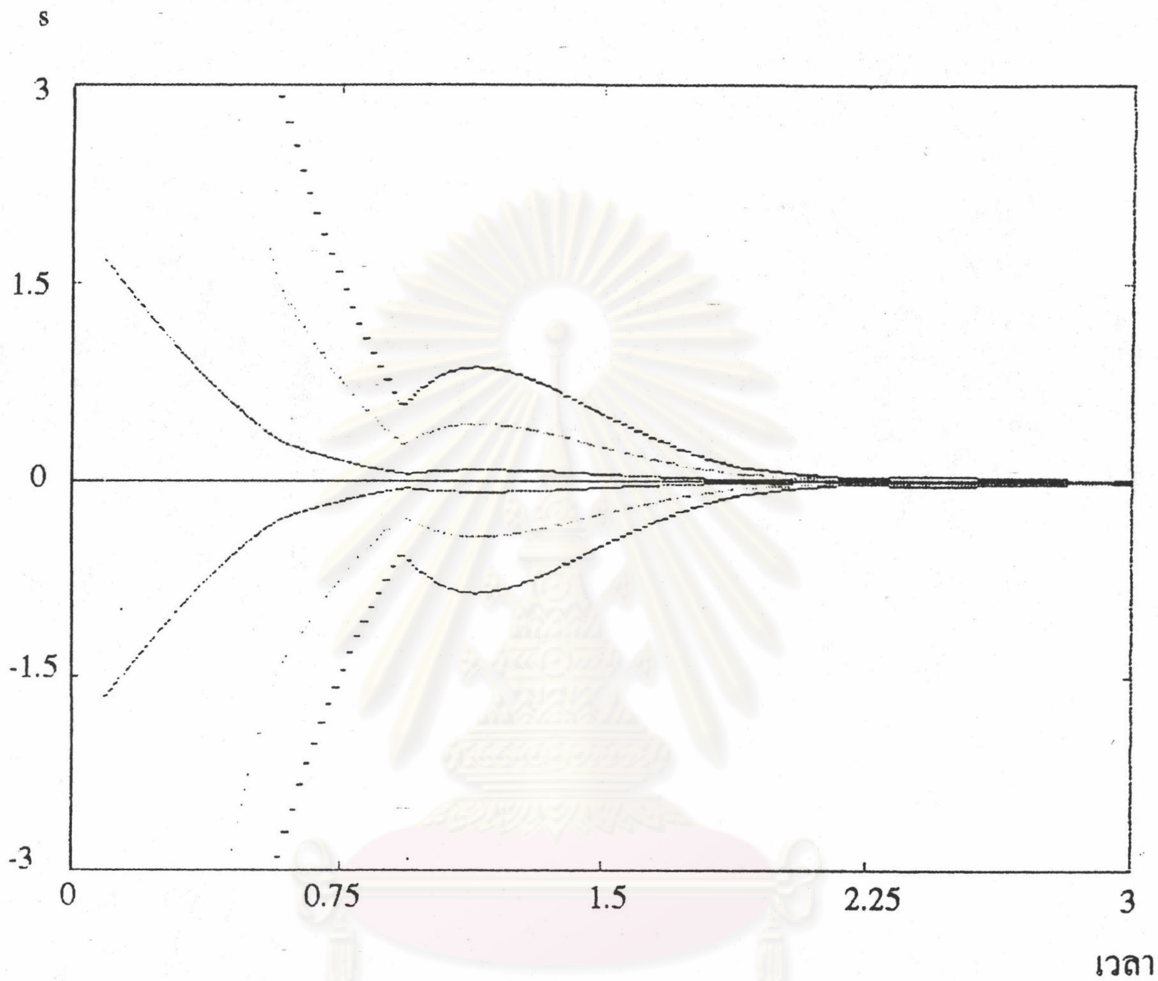
รูปที่ 4-10 กราฟระหว่างค่าสวิตชิงฟังก์ชัน (s) กับเวลา (ตัวอย่างที่ 1)
และค่าขอบเขตการแกว่ง กรณีที่เวลาชักตัวอย่างเท่ากับ 0.01



รูปที่ 4-11 กราฟระหว่างค่าสวิตชิงฟังก์ชัน (s) กับเวลา (ตัวอย่างที่ 1)
และค่าขอบเขตการแกว่ง กรณีที่เวลาชักตัวอย่างเท่ากับ 0.005



รูปที่ 4-12 กราฟระหว่างค่าสวิตชิงฟังก์ชัน (s) กับเวลา (ตัวอย่างที่ 1)
และค่าขอบเขตการแกว่ง กรณีที่เวลาชักตัวอย่างเท่ากับ 0.001



รูปที่ 4-13 กราฟระหว่างค่าขอบเขตการแกว่งกับเวลา (ตัวอย่างที่ 1)
กรณีที่เวลาชักตัวอย่างเท่ากับ 0.01 0.005 และ 0.001

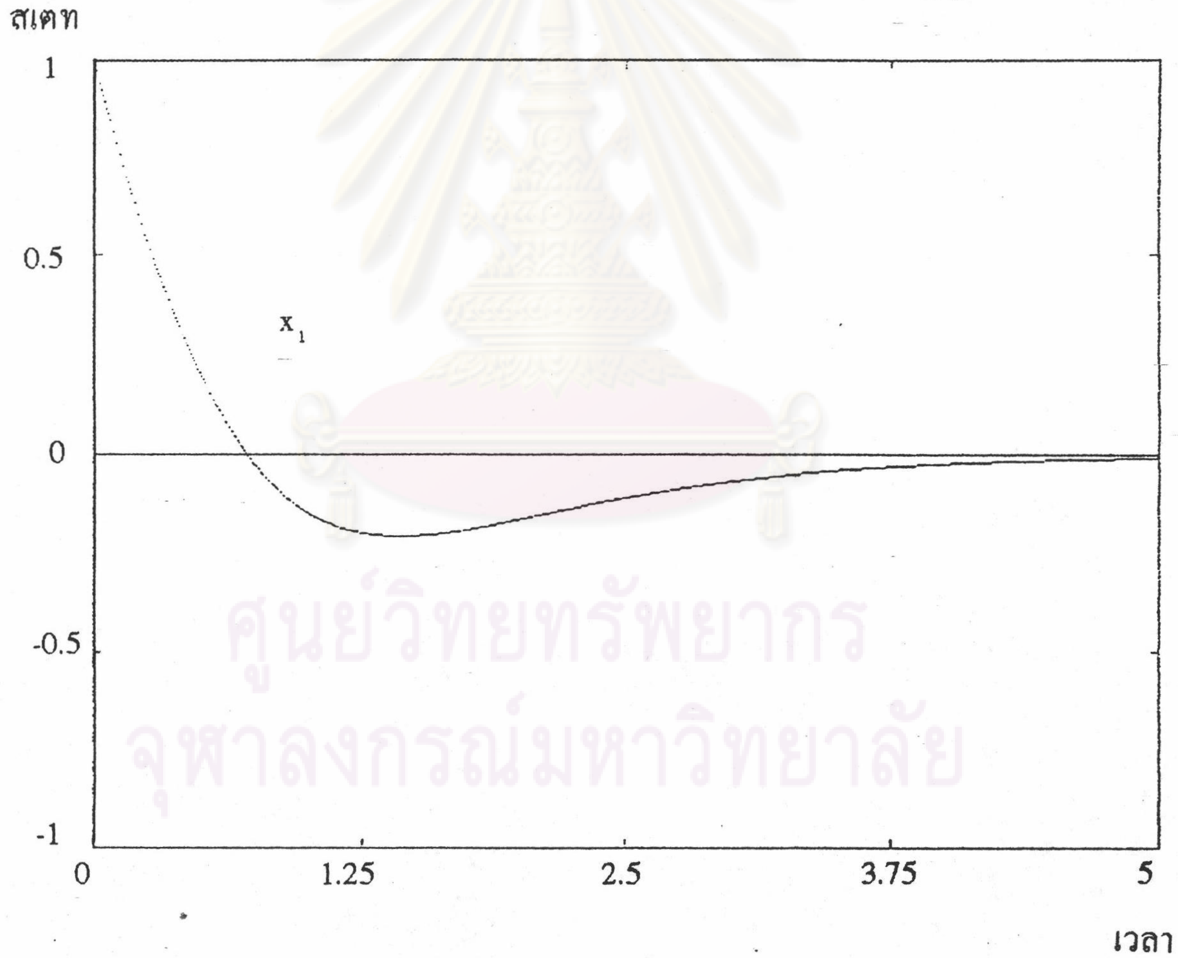
จากรูปที่ 4-13 แสดงให้เห็นว่าขอบเขตการแกว่งของระบบเดียวกันแต่มีเวลาชักตัวอย่างไม่เท่ากัน ทำให้ขอบเขตการแกว่งไม่เท่ากัน โดยระบบที่มีเวลาชักตัวอย่างน้อยกว่าจะมีขอบเขตการแกว่งที่น้อยกว่าระบบที่มีเวลาชักตัวอย่างมากกว่า

จากระบบควบคุมดังตัวอย่างที่ 2 ตามสมการที่ (4-12) และสมการที่ (4-20) และกำหนดสเตทเริ่มต้นเป็น

$$x_{init} = \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \\ 1 \\ -2 \end{bmatrix}$$

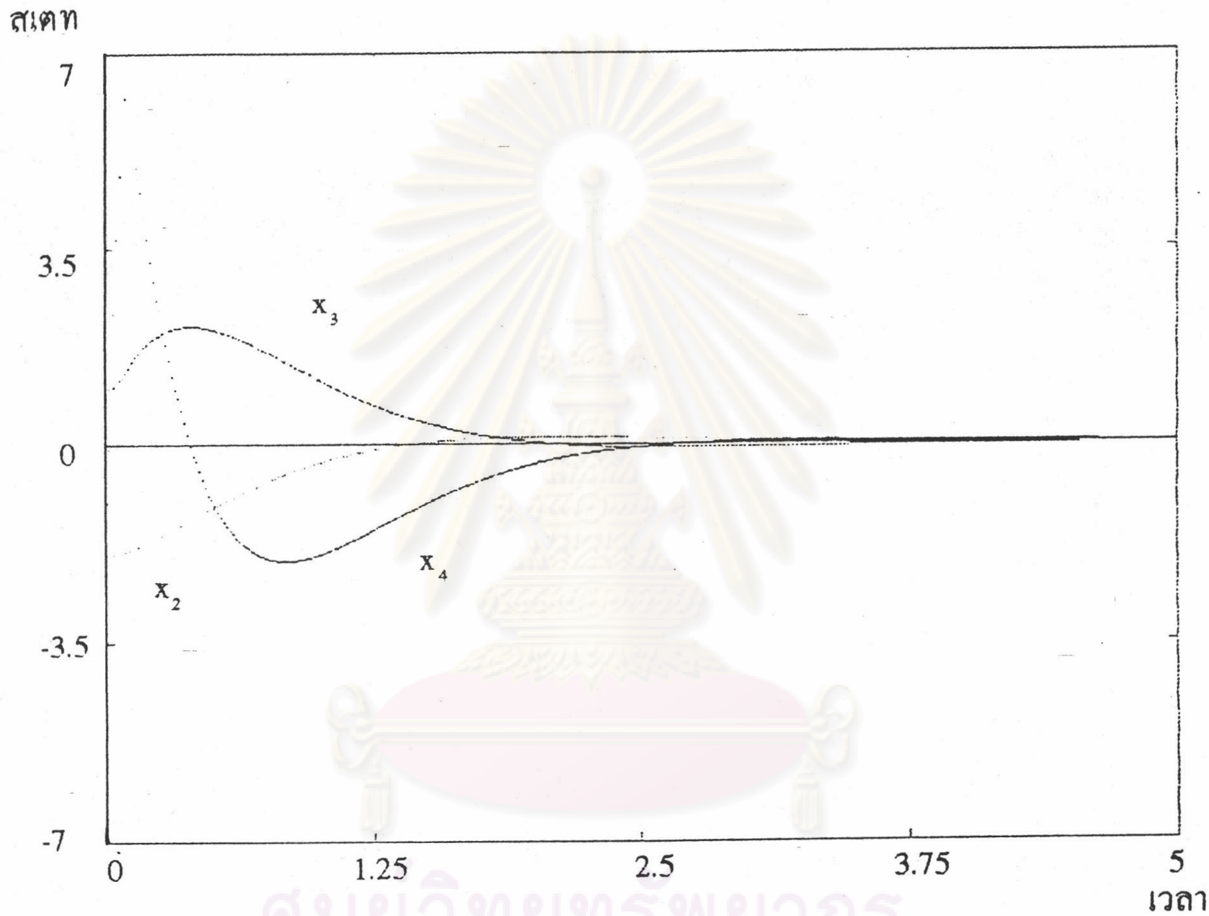
เมื่อจำลองแบบระบบได้ผลดังรูปต่างๆต่อไปนี้

ระบบในโดเมนเวลาต่อเนื่อง

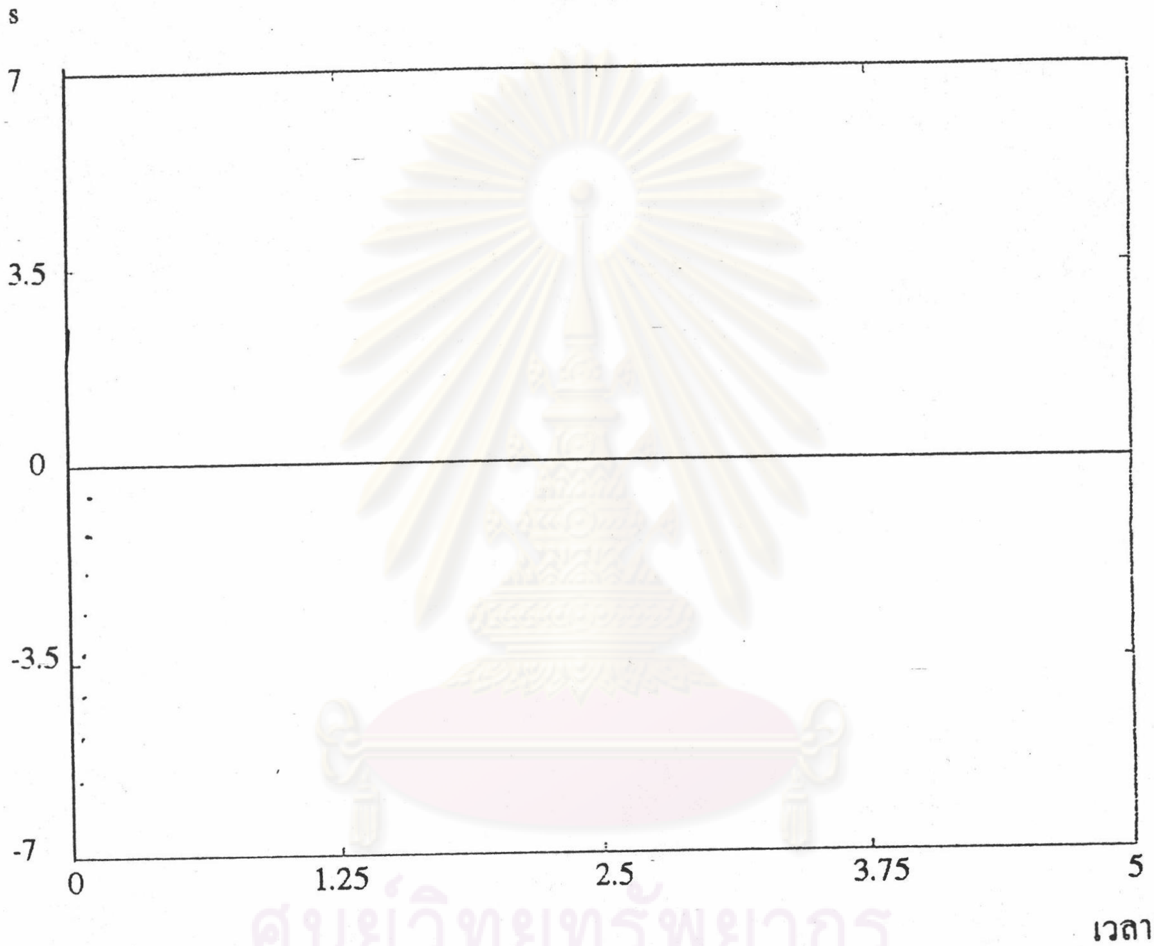


รูปที่ 4-14 กราฟระหว่างสเตท x_1 กับเวลา (ตัวอย่างที่ 2)

จากรูปที่ 4-14 แสดงให้เห็นว่าสเตท x_1 มีผลตอบตามสมการที่ (4-19)

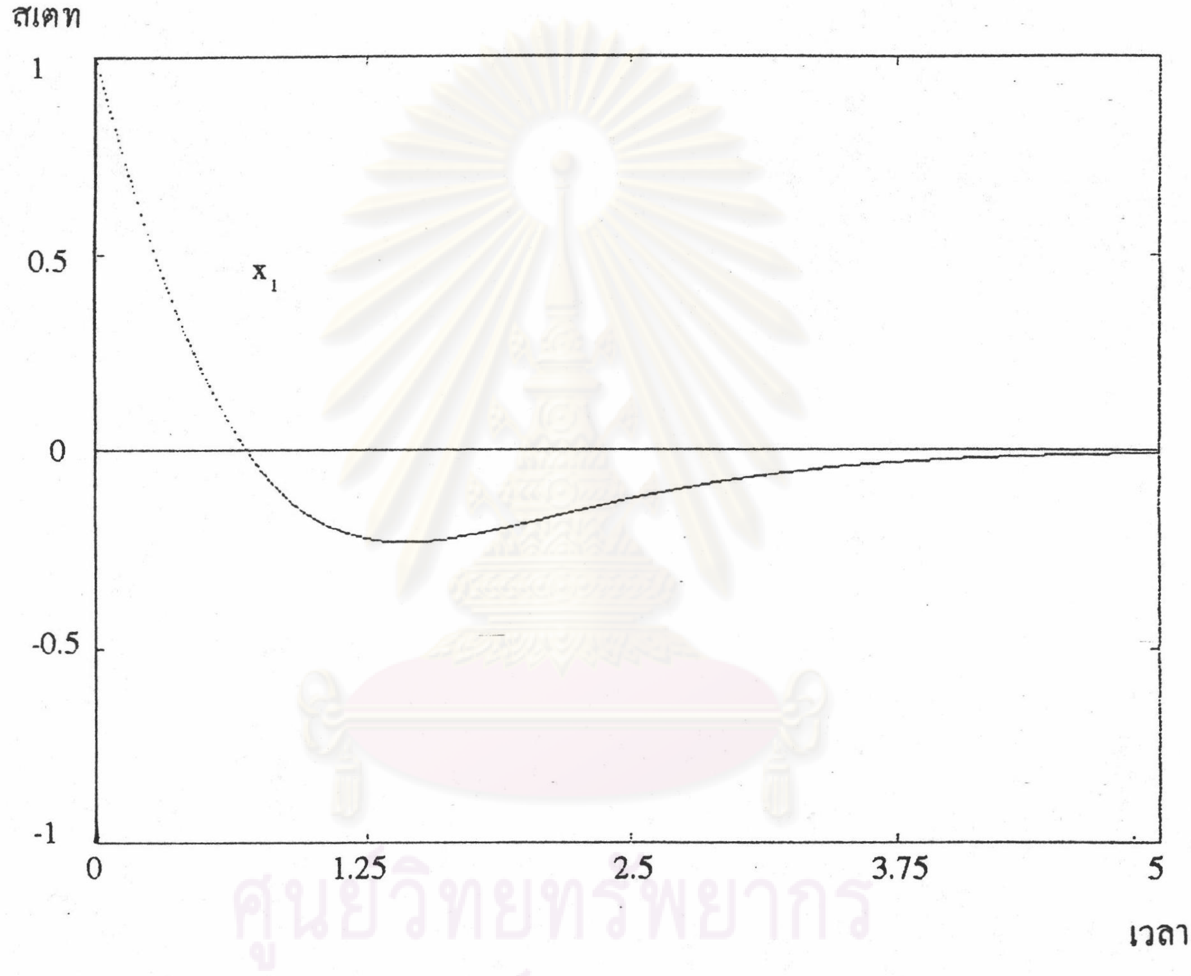


รูปที่ 4-15 กราฟระหว่างสเตท x_2 x_3 และ x_4 กับเวลา (ตัวอย่างที่ 2)

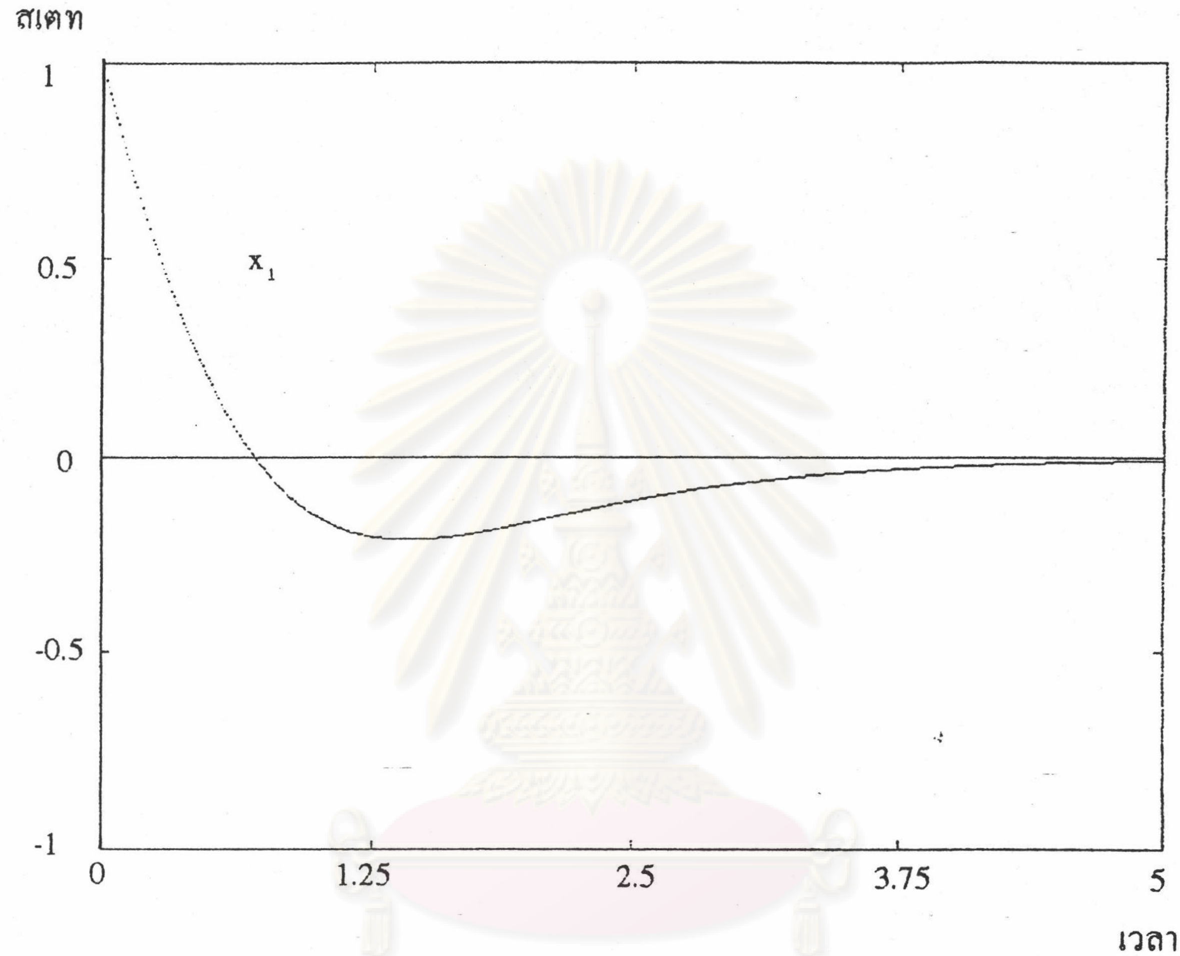


รูปที่ 4-16 กราฟระหว่างค่าสวิตชิงฟังก์ชัน (s) กับเวลา (ตัวอย่างที่ 2)

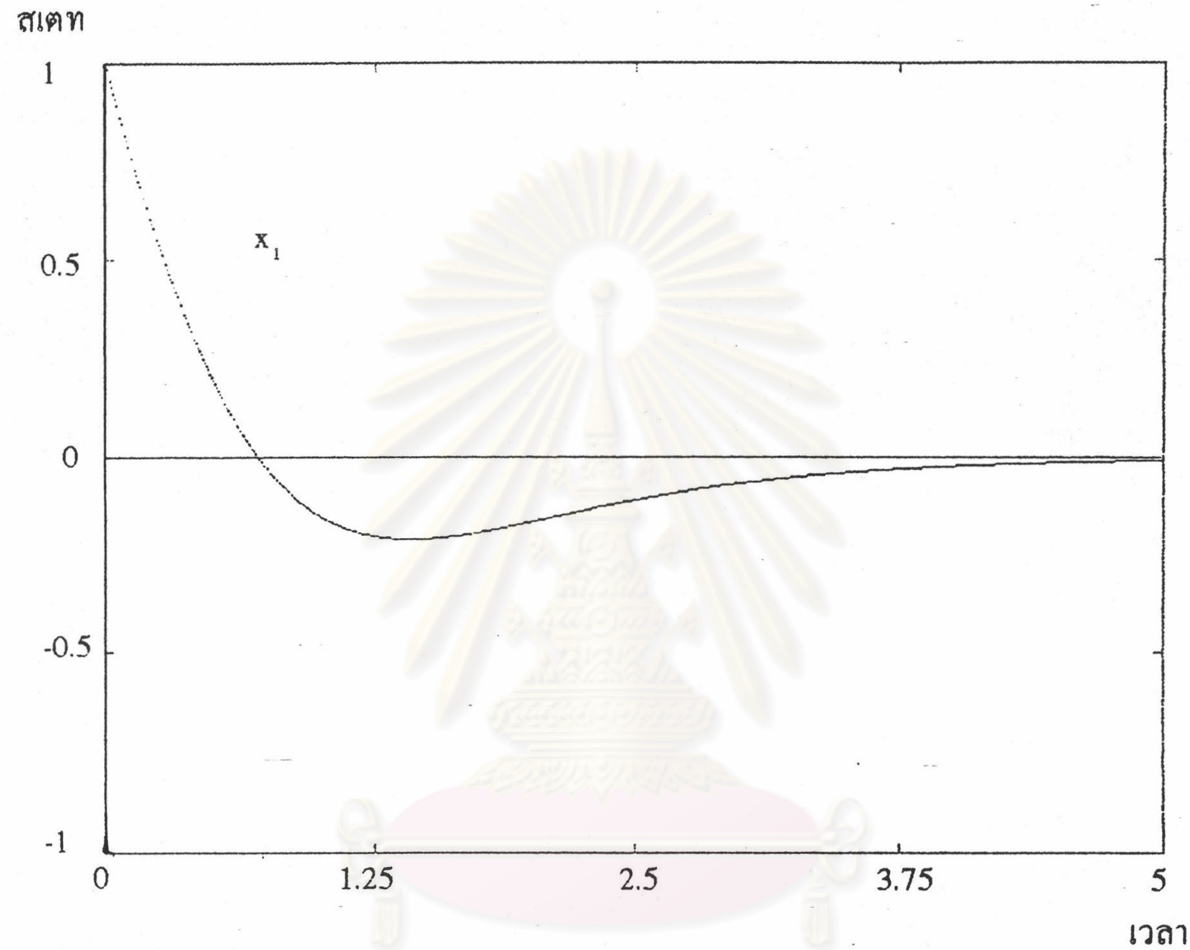
เมื่อแปลงระบบเป็นระบบควบคุมไม่ต่อเนื่องเชิงเวลาแบบปรับเปลี่ยนโครงสร้างของตัวควบคุมได้และใช้เวลาชักตัวอย่างค่าต่างๆกันได้ผลดังรูป



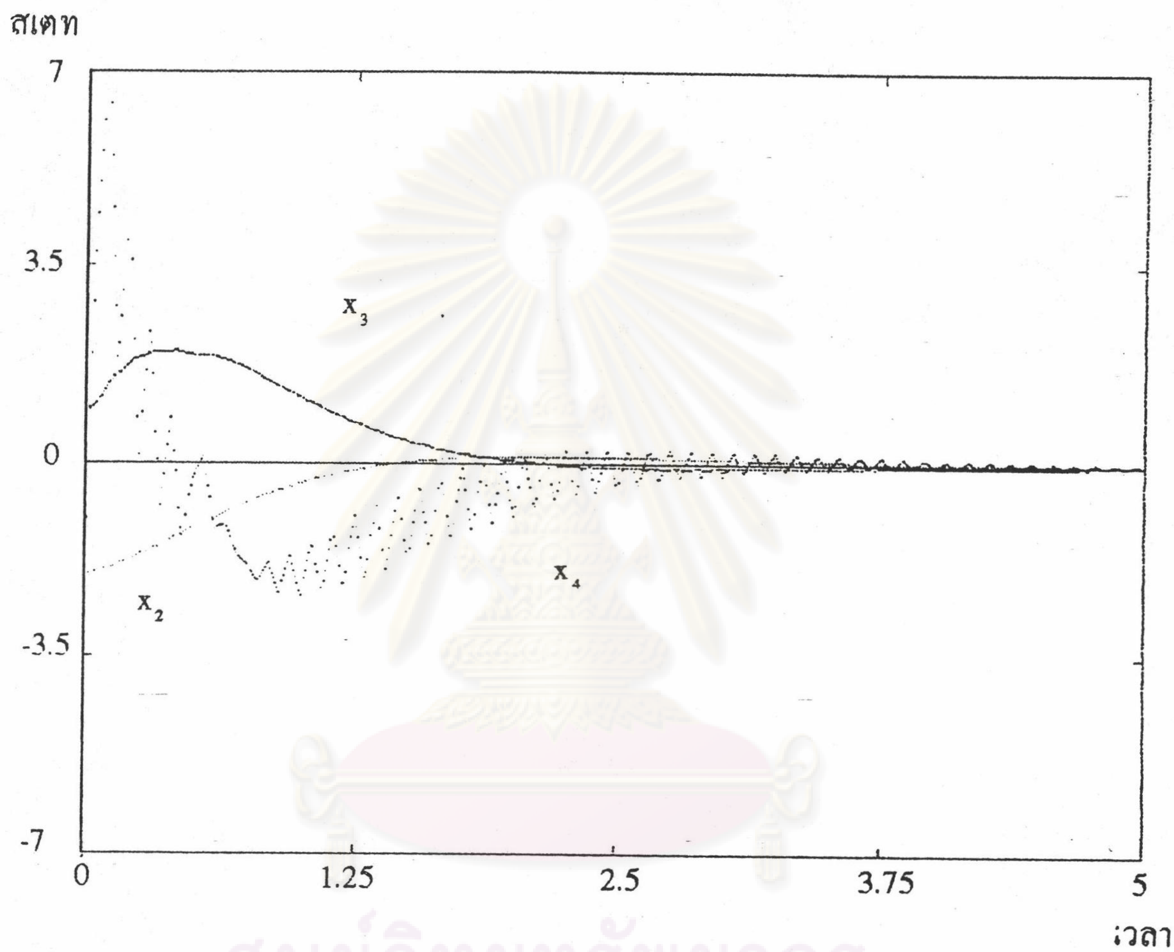
รูปที่ 4-17 กราฟระหว่างสเตท x_1 กับเวลา (ตัวอย่างที่ 2)
กรณีที่เวลาชักตัวอย่างเท่ากับ 0.05



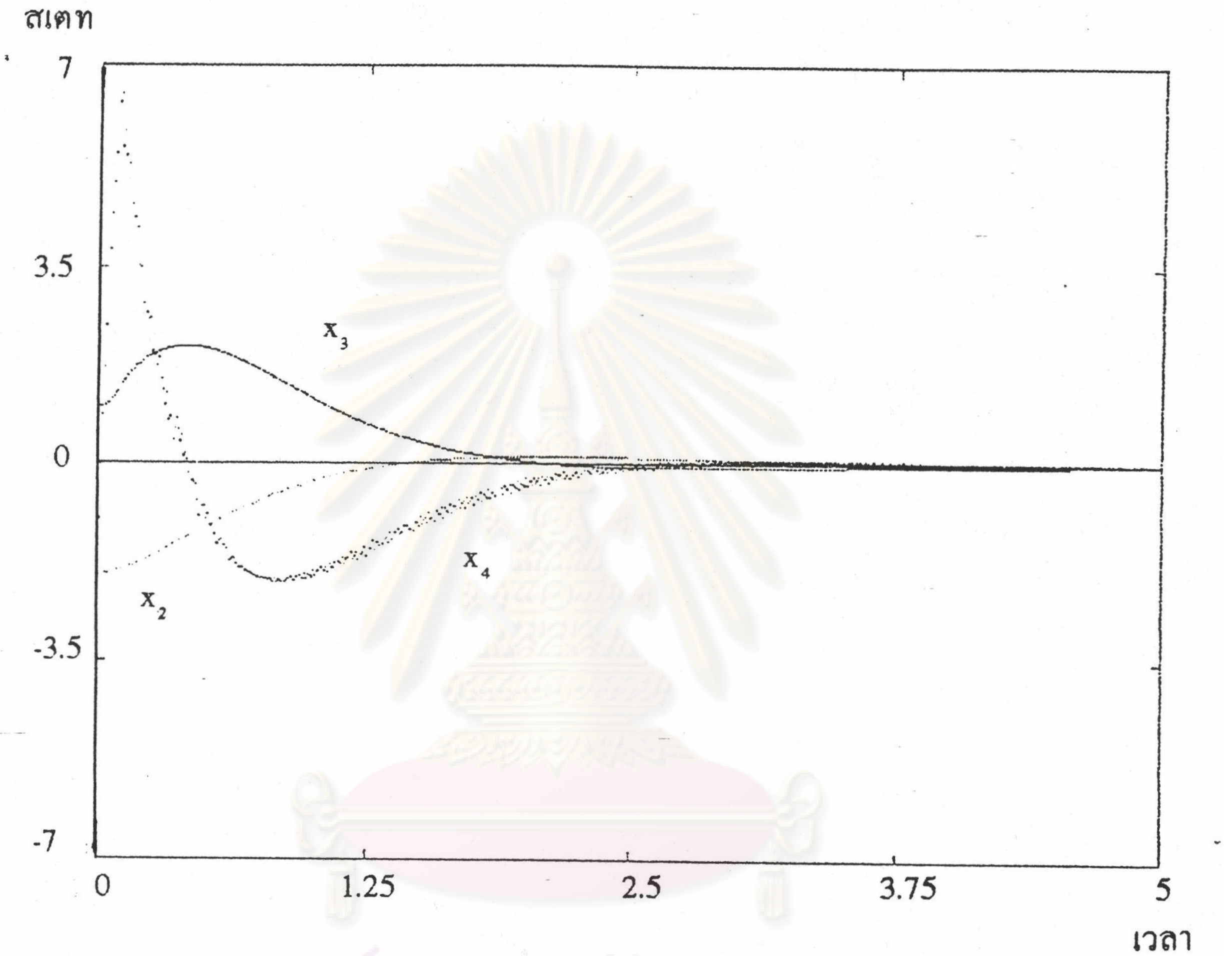
รูปที่ 4-18 กราฟระหว่างสเตท x_1 กับเวลา (ตัวอย่างที่ 2)
กรณีที่เวลาชักตัวอย่างเท่ากับ 0.01



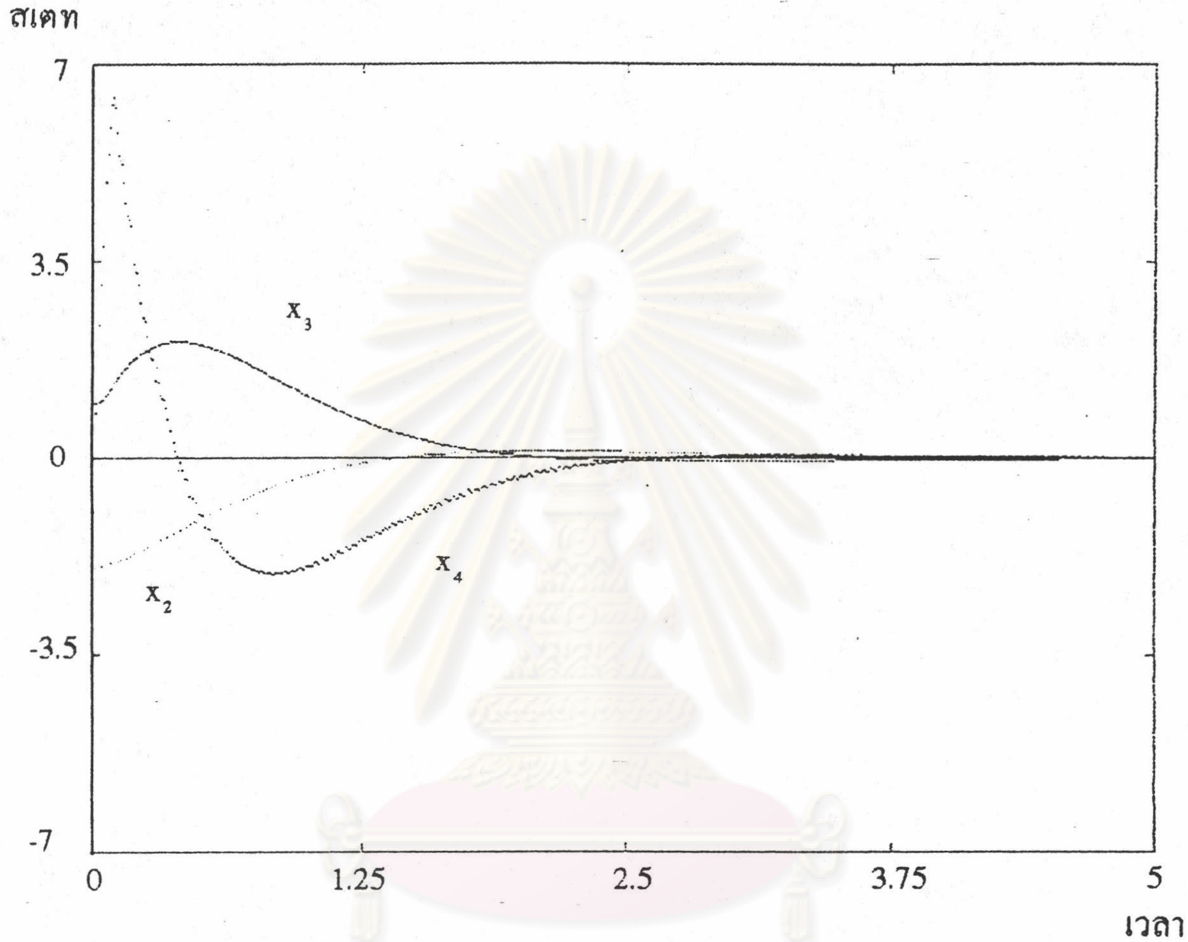
รูปที่ 4-19 กราฟระหว่างสเตท x_1 กับเวลา (ตัวอย่างที่ 2)
กรณีที่เวลาชักตัวอย่างเท่ากับ 0.005



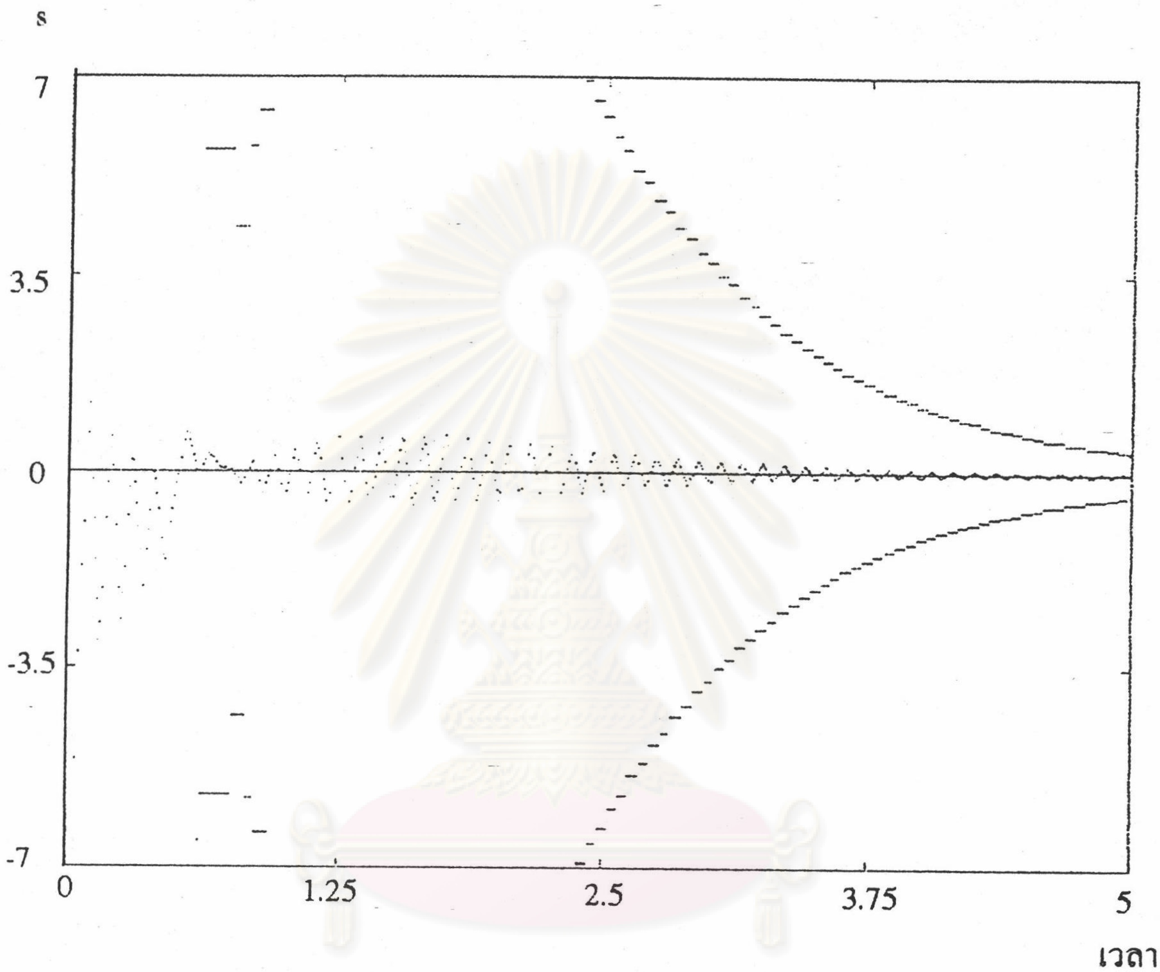
รูปที่ 4-20 กราฟระหว่างสเตท x_2 x_3 และ x_4 กับเวลา (ตัวอย่างที่ 2)
กรณีที่เวลาชักตัวอย่างเท่ากับ 0.05



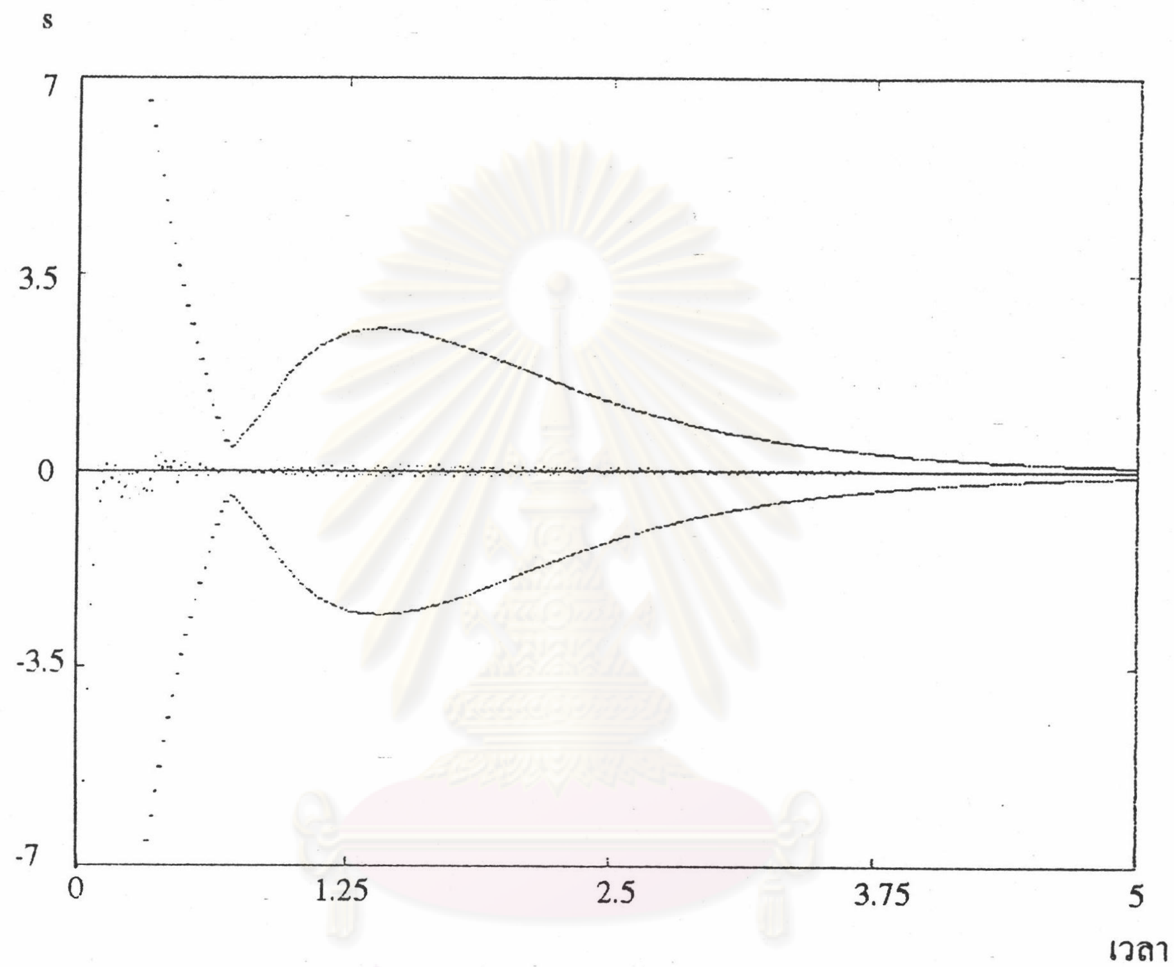
รูปที่ 4-21 กราฟระหว่างสเตท x_2 x_3 และ x_4 กับเวลา (ตัวอย่างที่ 2)
กรณีที่เวลาชักตัวอย่างเท่ากับ 0.01



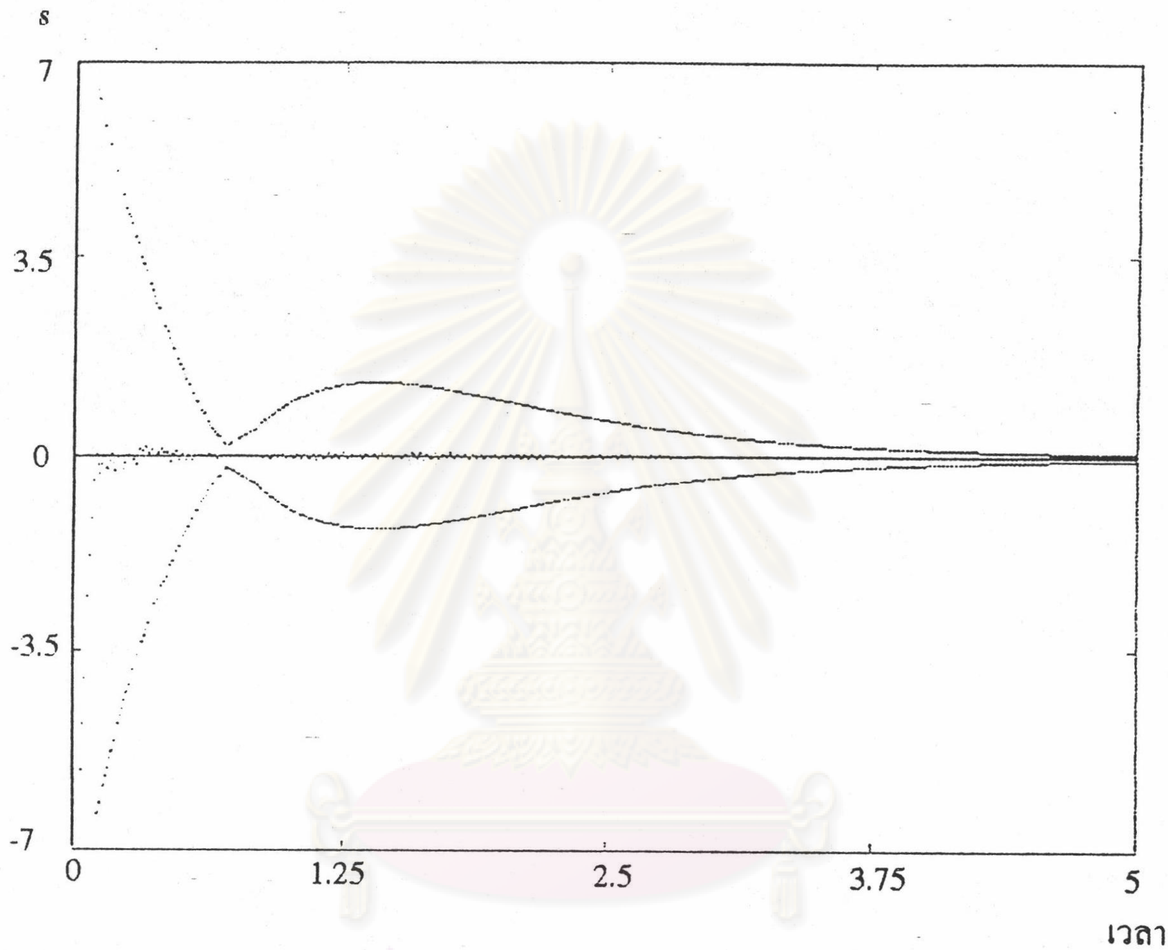
รูปที่ 4-22 กราฟระหว่างสเตท x_2 x_3 และ x_4 กับเวลา (ตัวอย่างที่ 2)
กรณีที่เวลาชักตัวอย่างเท่ากับ 0.005



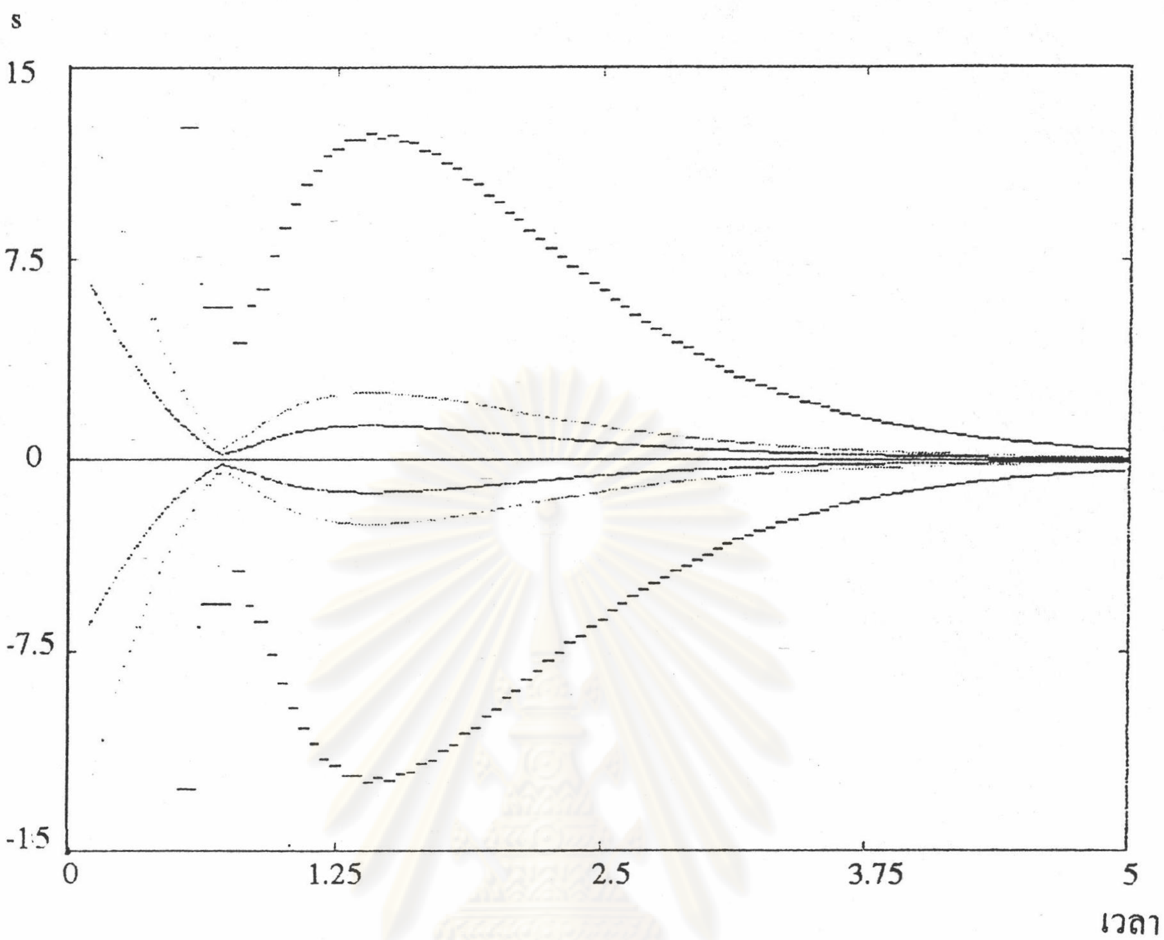
รูปที่ 4-23 กราฟระหว่างค่าสวิตชิงฟังก์ชัน (s) กับเวลา (ตัวอย่างที่ 2)
และค่าขอบเขตการแกว่ง กรณีที่เวลาชักตัวอย่างเท่ากับ 0.05



รูปที่ 4-24 กราฟระหว่างค่าสวิตชิงฟังก์ชัน (s) กับเวลา (ตัวอย่างที่ 2) และค่าขอบเขตการแกว่ง กรณีที่เวลาชักตัวอย่างเท่ากับ 0.01



รูปที่ 4-25 กราฟระหว่างค่าสวิตชิงฟังก์ชัน (s) กับเวลา (ตัวอย่างที่ 2)
และค่าขอบเขตการแกว่ง กรณีที่เวลาชักตัวอย่างเท่ากับ 0.005



รูปที่ 4-26 กราฟระหว่างค่าขอบเขตการแกว่งกับเวลา (ตัวอย่างที่ 2)

กรณีที่เวลาชักตัวอย่างเท่ากับ 0.05 0.01 และ 0.005

จากรูปที่ 4-26 แสดงให้เห็นว่าขอบเขตการแกว่งของระบบเดียวกันแต่มีเวลาชักตัวอย่างไม่เท่ากัน นั้นมีค่าไม่เท่ากัน โดยระบบที่มีเวลาชักตัวอย่างน้อยกว่าจะมีขอบเขตการแกว่งที่น้อยกว่าระบบที่มีเวลาชักตัวอย่างมากกว่า

จากตัวอย่างทั้งสองตัวอย่างและรูปกราฟต่างๆแสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมไม่ต่อเนื่องเชิงเวลาแบบปรับเปลี่ยนโครงสร้างของตัวควบคุมได้จะมีการแกว่งสัมพันธ์กับค่าเวลาชักตัวอย่างแบบแปรตามกัน และมีขอบเขตการแกว่งในลักษณะที่คล้ายกันคือสัมพันธ์กับเวลาชักตัวอย่างในลักษณะแปรตามกัน โดยค่าทั้งสองจะมีความสัมพันธ์กับสเตทต่างๆบนพื้นผิวสวิตชิง และพารามิเตอร์ของระบบในโดเมนเวลาต่อเนื่องอีกด้วย