ディジタル電子回路

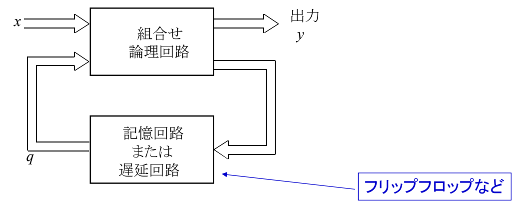
第11回

順序回路

順序回路:出力が現在の入力、**および過去の入力**によって決定。

（フリップフロップも順序回路の一例）

同期式順序回路:回路の状態がクロックパルスに同期して変化。
非同期式順序回路:クロックパルスを用いない。

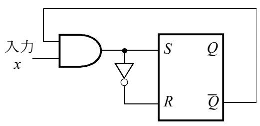


非同期式順序回路の不安定状態と誤動作

非同期式順序回路 :状態の遷移の過程(過渡状態)で不安定な状態が存在

⟶ 誤動作の恐れ

発振の可能性



(a) 回路

現状態 Q	次状態Q' 入力 x 0	1
0	0	1
1	0	0

(b) フロー表

遅延時間の差等で誤動作する場合もある。

⇨ 速度などを優先させる場合、非同期式を用いる場合もあるが、
ほとんどの場合、同期式が用いられる。
ここでは同期式のみを扱う。

状態遷移図

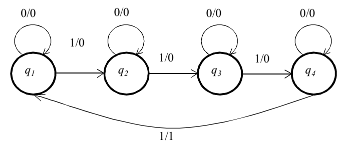
回路の初期状態 q_i

入力 x_k によって y_l を出力し、q_jに変化する。

回路の初期状態 q_i

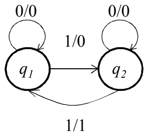
入力 $x_{k'}$ によって $y_{l'}$ を出力し、q_i のまま状態は変化しない。

＜4進カウンタの状態遷移図＞



状態遷移図　自動販売機の例

(1)10円硬貨だけを投入できる。
(2)20円投入されたら、ガムを出力する。



(1)初期状態q_1と
10円投入された状態q_2
を考える。

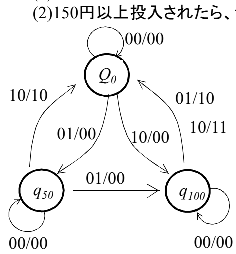
(2)初期状態に
10円投入されたら、q_1からq_2へ遷移する。

(3) 10円が投入されなかったら状態維持

(4) 状態q_2で10円が投入されたら
ガムを出力して、初期状態に戻る

状態遷移図　もうすこし難しい自動販売機

(1)50円硬貨と100円硬貨が投入できる。
(2)150円以上投入されたら、ジュースとおつりを出力する。



(1)初期状態q_0と
50円が投入された状態q_{50}
100円が投入された状態q_{100}
を考える。

(2)初期状態から硬貨が投入されたら
該当する状態へ遷移する。
50円硬貨の入力を01
100円硬貨入力を10としよう。

(3)硬貨が投入されない(00)なら状態維持
50円の状態に50円投入されたら100円に

(4) 150円になったら
ジュースを出力する。出力記号10

(5) 投入額が200円の時は50円も出力。
出力記号11

状態遷移図　パターン検出器

二値信号で1011という入力系列が連続してきたらパターン検出を出力する回路

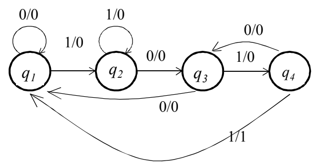
(1)初期状態q_1と　　1が入力された状態q_2
10まで入力された状態q_3　　101まで入力された状態$q4$を考える。

(2)状態$q1$へ1が入力されたら$q2$へ　0が入力されたらそのまま

(3)状態$q2$へ0が入力されたら$q3$へ　1が入力したら、1入力済みなので$q2$へ

(4)状態$q3$へ1が入力されたら$q4$へ　0が入力されたら、初期状態q1へ

(5)状態$q4$へ1が入力されたら出力1を出し初期状態$q1$へ
0が入力されたら10が入力された状態なので状態q3へ



順序回路の実現

状態遷移図　から　順序回路を作るとき、どのように状態を覚えるか
がつぎの課題

当然フリップフロップを使うが、
一つのフリップフロップは0と1の二つの状態を覚えることができる。

ここで、4つの状態があったとする。
二つの考え方がある。

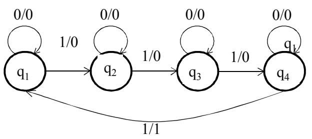
1. 2つのフリップフロップで、00,01,10,11と4つの状態にして覚える。
2. 4つのフリップフロップで、1つのフリップフロップで状態を覚える。

1. の場合、フリップフロップの数が減らせる。今週はこの形で実現する。
2. の場合、回路を考えるのは簡単になる。ワンホットコードと呼ばれる。
来週、この話をする。

同期式順序回路の解析

順序回路から、状態遷移図をつくる解析を行う準備を行う。
まず途中の仲立ちとして、状態遷移表を作り、次に状態遷移図を作ろう。

状態遷移図
＜4進カウンタ＞



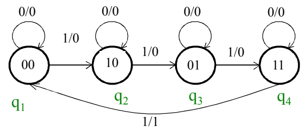
状態遷移表

現状態 q	次状態q' 入力 x 0	次状態q' 入力 x 1	出力y 入力 x 0	出力y 入力 x 1
q_1	q_1	q_2	0	0
q_2	q_2	q_3	0	0
q_3	q_3	q_4	0	0
q_4	q_4	q_1	0	1

同期式順序回路の状態遷移表

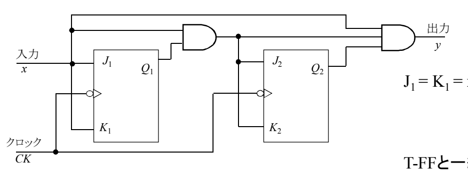
	現状態 Q_1、Q_2	次状態Q_1', Q_2' 入力 x 0	次状態Q_1', Q_2' 入力 x 1	出力y 入力 x 0	出力y 入力 x 1
q_1	0　0	q_1 0　0	1　0 q_2	0	0
q_3	0　1	q_3 0　1	1　1 q_4	0	0
q_2	1　0	q_2 1　0	0　1 q_3	0	0
q_4	1　1	q_4 1　1	0　0 q_1	0	1

状態遷移図を書け



各状態 q_i に2進数を割当てることを**状態割当**という。
回路から状態遷移表を作るときは自動的に割り当てらる。

同期式順序回路の状態遷移表



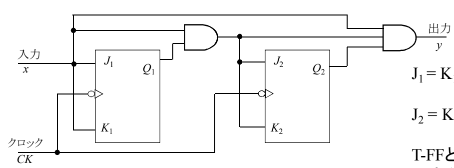
$J_1 = K_1 = x$

T-FFと一緒で、
入力が1だと反転する

現状態 Q_1、Q_2	次状態Q_1', Q_2' 入力 x 0	次状態Q_1', Q_2' 入力 x 1	出力y 入力 x 0	出力y 入力 x 1
0　0	0	1		
0　1	0	1		
1　0	1	0		
1　1	1	0		

Q_1' はx=1だと反転する
x=0だと保持

同期式順序回路の状態遷移表



$J_1 = K_1 = x$

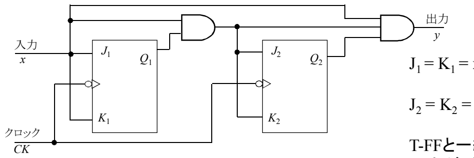
$J_2 = K_2 = Q_1 \cdot x$

T-FFと一緒で、
入力が1だと反転する

現状態 Q_1、Q_2	次状態Q_1', Q_2' 入力 x 0	次状態Q_1', Q_2' 入力 x 1	出力y 入力 x 0	出力y 入力 x 1
0　0	0　0	1　0		
0　1	0　1	1　1		
1　0	1　0	0　1		
1　1	1　1	0　0		

Q_2' は$Q_1 \cdot$x=1だと反転する
それ以外は保持

同期式順序回路の状態遷移表



$J_1 = K_1 = x$

$J_2 = K_2 = Q_1 \cdot x$

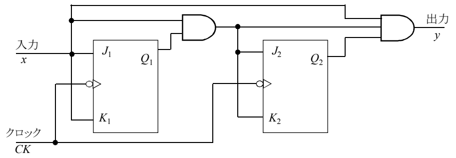
T-FFと一緒で、
入力が1だと反転する

$y = Q_1 \cdot Q_2 \cdot x$

現状態 Q_1、Q_2	次状態 Q_1', Q_2' 入力 x = 0	次状態 Q_1', Q_2' 入力 x = 1	出力y 入力 x = 0	出力y 入力 x = 1
0 0	0 0	1 0	0	0
0 1	0 1	1 1	0	0
1 0	1 0	0 1	0	0
1 1	1 1	0 0	0	1

$y = Q_1 \cdot Q_2 \cdot x = 1$
はここだけ

同期式順序回路の状態遷移表（2）



	現状態 Q_2、Q_1	次状態 Q_2', Q_1' 入力 x = 0	次状態 Q_2', Q_1' 入力 x = 1	出力y 入力 x = 0	出力y 入力 x = 1
q_1	0 0	q_1 0 0	0 1 q_2	0	0
q_2	0 1	q_2 0 1	1 0 q_3	0	0
q_3	1 0	q_3 1 0	1 1 q_4	0	0
q_4	1 1	q_4 1 1	0 0 q_1	0	1

状態遷移関数と出力関数

現状態 Q_1、Q_2	次状態 Q_1', Q_2' 入力 x = 0	次状態 Q_1', Q_2' 入力 x = 1	出力y 入力 x = 0	出力y 入力 x = 1
0 0	0 0	1 0	0	0
0 1	0 1	1 1	0	0
1 0	1 0	0 1	0	0
1 1	1 1	0 0	0	1

$$Q_1' = \overline{Q_1} \cdot \overline{Q_2} \cdot x + \overline{Q_1} \cdot Q_2 \cdot x + Q_1 \cdot \overline{Q_2} \cdot \overline{x} + Q_1 \cdot Q_2 \cdot \overline{x}$$

$$Q_2' = \overline{Q_1} \cdot Q_2 \cdot \overline{x} + Q_1 \cdot Q_2 \cdot \overline{x} + \overline{Q_1} \cdot Q_2 \cdot x + Q_1 \cdot \overline{Q_2} \cdot x$$

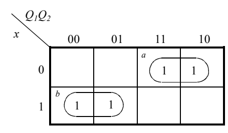
$$y = Q_1 \cdot Q_2 \cdot x$$

状態遷移関数と出力関数

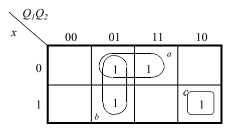
$$Q_1' = \overline{Q_1} \cdot \overline{Q_2} \cdot x + \overline{Q_1} \cdot Q_2 \cdot x + Q_1 \cdot \overline{Q_2} \cdot \overline{x} + Q_1 \cdot Q_2 \cdot \overline{x}$$

$$Q_2' = \overline{Q_1} \cdot Q_2 \cdot \overline{x} + Q_1 \cdot Q_2 \cdot \overline{x} + \overline{Q_1} \cdot Q_2 \cdot x + Q_1 \cdot \overline{Q_2} \cdot x$$

$y = Q_1 \cdot Q_2 \cdot x$　**出力関数**



(a) Q_1'のカルノー図



(b) Q_2'のカルノー図

$Q_1' = Q_1 \cdot \overline{x} + \overline{Q_1} \cdot x$

$Q_2' = Q_2 \cdot \overline{x} + \overline{Q_1} \cdot Q_2 + Q_1 \cdot \overline{Q_2} \cdot x$

状態遷移関数

順序回路の実現（冗長な状態が無い場合）

記憶回路の特性表とは？
遷移の仕方について、どんな入力が必要かを示した表

D-FFは、入力をそのまま出力するので、おなじ記号

SR-FFは、
0から0にしたい→保持とみて (S,R)=(0,0)またはリセットしたとみて (S,R)=(0,1)
0から1にしたい→セットしたとみて (S,R)=(1,0)
1から0にしたい→リセットしたとみて (S,R)=(0,1)
1から1にしたい→保持とみて (S,R)=(0,0)またはセットしたとみて (S,R)=(1,0)

遷移先 $Q \to Q'$	入力 D	$S\ R$	$J\ K$	T
$0 \to 0$	0	0 φ		
$0 \to 1$	1	1 0		
$1 \to 0$	0	0 1		
$1 \to 1$	1	φ 0		

順序回路の実現（冗長な状態が無い場合）

JK-FFは、
0から0にしたい→保持とみて (J,K)=(0,0)またはリセットしたとみて (J,K)=(0,1)
0から1にしたい→セットしたとみて (J,K)=(1,0)
　　　　　　　　または反転したとみて (J,K)=(1,1)
1から0にしたい→リセットしたとみて (J,K)=(0,1)
　　　　　　　　または反転したとみて (J,K)=(1,1)
1から1にしたい→保持とみて (J,K)=(0,0)またはセットしたとみて (J,K)=(1,0)

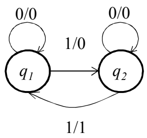
T-FFは、T=0なら保持、T=1なら反転なので

遷移先 $Q \to Q'$	入力 D	$S\ R$	$J\ K$	T
$0 \to 0$	0	0 φ	0 φ	0
$0 \to 1$	1	1 0	1 φ	1
$1 \to 0$	0	0 1	φ 1	1
$1 \to 1$	1	φ 0	φ 0	0

順序回路の実現（冗長な状態が無い場合） 2進カウンタ

2進カウンタ

（ⅰ） 与えられた条件より、状態遷移図を描く。



（ⅱ） 状態遷移図より、状態遷移表を求める。

現状態 q	次状態q’ 入力 x 0	次状態q’ 入力 x 1	出力y 入力 x 0	出力y 入力 x 1
q_1	q_1	q_2	0	0
q_2	q_2	q_1	0	1

（ⅲ） 状態遷移表あるいは状態遷移図で、冗長な状態があればこれを簡単化する（冗長な状態はこの例ではない）。

（ⅳ） 安定な状態 q に対して、2進数を割り当てる。***状態割当て***へ進む。

順序回路の実現（冗長な状態が無い場合） 2進カウンタ

2進カウンタ

状態割当て

$q_1 = (0)$

$q_2 = (1)$

現状態 q		次状態q’ 入力 x 0	次状態q’ 入力 x 1	出力y 入力 x 0	出力y 入力 x 1
q_1	0	0	1	0	0
q_2	1	1	0	0	1

状態遷移関数

$Q' = \bar{Q} \cdot x + Q \cdot \bar{x}$

（ⅴ） 使用する記憶回路の特性表より、それぞれの次状態 q'を得るのに必要な記憶回路の入力状態 u を求める。

順序回路の実現（冗長な状態が無い場合） 2進カウンタ

現状態 q		次状態q’ 入力 x 0	次状態q’ 入力 x 1	出力y 入力 x 0	出力y 入力 x 1
q_1	0	0	1	0	0
q_2	1	1	0	0	1

遷移先 入力

$Q \to Q'$	D	$S\ R$	$J\ K$	T
$0 \to 0$	0	0 φ	0 φ	0
$0 \to 1$	1	1 0	1 φ	1
$1 \to 0$	0	0 1	φ 1	1
$1 \to 1$	1	φ 0	φ 0	0

制御入力表

:状態遷移表の次状態を、その状態を発生するフリップフロップの入力状態で表した表をつくる。

まずD-FF　Q=0で x=0ならば、Q=0に、x=1ならば、Q=1に、なる。

Q=1で x=0ならば、Q=1に、x=1ならば、Q=0に、なる。

Q	D 0	D 1	S 0	S 1	R 0	R 1	J 0	J 1	K 0	K 1	T 0	T 1
0	0	1										
1	1	0										

$d = x \cdot \bar{q} + \bar{x} \cdot q$

順序回路の実現（冗長な状態が無い場合） 2進カウンタ

現状態 q		次状態q’ 入力 x 0	次状態q’ 入力 x 1	出力y 入力 x 0	出力y 入力 x 1
q_1	0	0	1	0	0
q_2	1	1	0	0	1

遷移先 入力

$Q \to Q'$	D	$S\ R$	$J\ K$	T
$0 \to 0$	0	0 φ	0 φ	0
$0 \to 1$	1	1 0	1 φ	1
$1 \to 0$	0	0 1	φ 1	1
$1 \to 1$	1	φ 0	φ 0	0

制御入力表

:状態遷移表の次状態を、その状態を発生するフリップフロップの入力状態で表した表をつくる。

SR-FF　Q=0で x=0ならば、Q=0に、x=1ならば、Q=1に、なる。

Q=1で x=0ならば、Q=1に、x=1ならば、Q=0に、なる。

Q	D 0	D 1	S 0	S 1	R 0	R 1	J 0	J 1	K 0	K 1	T 0	T 1
0	0	1	0	1	φ	0						
1	1	0	φ	0	0	1						

$d = x \cdot \bar{q} + \bar{x} \cdot q$　$s = x \cdot \bar{q}$　$r = x \cdot q$

順序回路の実現（冗長な状態が無い場合） 2進カウンタ

現状態 q		次状態q’ 入力 x 0	次状態q’ 入力 x 1	出力y 入力 x 0	出力y 入力 x 1
q_1	0	0	1	0	0
q_2	1	1	0	0	1

遷移先 入力

$Q \to Q'$	D	$S\ R$	$J\ K$	T
$0 \to 0$	0	0 φ	0 φ	0
$0 \to 1$	1	1 0	1 φ	1
$1 \to 0$	0	0 1	φ 1	1
$1 \to 1$	1	φ 0	φ 0	0

制御入力表

:状態遷移表の次状態を、その状態を発生するフリップフロップの入力状態で表した表をつくる。

JK-FF　Q=0で x=0ならば、Q=0に、x=1ならば、Q=1に、なる。

Q=1で x=0ならば、Q=1に、x=1ならば、Q=0に、なる。

Q	D 0	D 1	S 0	S 1	R 0	R 1	J 0	J 1	K 0	K 1	T 0	T 1
0	0	1	0	1	φ	0	0	1	φ	φ		
1	1	0	φ	0	0	1	φ	φ	0	1		

$d = x \cdot \bar{q} + \bar{x} \cdot q$　$s = x \cdot \bar{q}$　$r = x \cdot q$　$j = k = x$

順序回路の実現（冗長な状態が無い場合） 2進カウンタ

現状態 q		次状態q’ 入力 x 0	次状態q’ 入力 x 1	出力y 入力 x 0	出力y 入力 x 1
q_1	0	0	1	0	0
q_2	1	1	0	0	1

遷移先 入力

$Q \to Q'$	D	$S\ R$	$J\ K$	T
$0 \to 0$	0	0 φ	0 φ	0
$0 \to 1$	1	1 0	1 φ	1
$1 \to 0$	0	0 1	φ 1	1
$1 \to 1$	1	φ 0	φ 0	0

制御入力表

:状態遷移表の次状態を、その状態を発生するフリップフロップの入力状態で表した表をつくる。

T-FF　Q=0で x=0ならば、Q=0に、x=1ならば、Q=1に、なる。

Q=1で x=0ならば、Q=1に、x=1ならば、Q=0に、なる。

Q	D 0	D 1	S 0	S 1	R 0	R 1	J 0	J 1	K 0	K 1	T 0	T 1
0	0	1	0	1	φ	0	0	1	φ	φ	0	1
1	1	0	φ	0	0	1	φ	φ	0	1	0	1

$d = x \cdot \bar{q} + \bar{x} \cdot q$　$s = x \cdot \bar{q}$　$r = x \cdot q$　$j = k = x$　$t = x$

順序回路の実現（冗長な状態が無い場合） 2進カウンタ

制御入力表より、2進カウンタを作るには、

D-FFなら $d = x \bullet \bar{q} + \bar{x} \bullet q$

これは**状態遷移関数**と同じである。通常D-FFは状態遷移関数と同じまま

SR-FFなら $s = x \bullet \bar{q} \quad r = x \bullet q$

JK-FFなら $j = k = x$

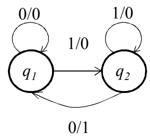
T-FFなら $t = x$

という入力を入れてあげれば良いことが判る。

順序回路の実現（冗長な状態が無い場合） 1→0識別回路

つぎに1→0という入力があったら、1を出力する識別回路

（ⅰ） 与えられた条件より、状態遷移図を描く。



（ⅱ） 状態遷移図より、状態遷移表を求める。

現状態 q	次状態q' 入力 x 0	次状態q' 入力 x 1	出力y 入力 x 0	出力y 入力 x 1
q_1	q_1	q_2	0	0
q_2	q_1	q_2	1	0

（ⅲ） 状態遷移表あるいは状態遷移図で、冗長な状態があればこれを簡単化する（冗長な状態はこの例ではない）。

（ⅳ） 安定な状態 q に対して、2進数を割り当てる。***状態割当て***へ進む。

順序回路の実現（冗長な状態が無い場合） 1→0識別回路

この二状態でも
状態割当てで、
それほど状態はかわらないが、

$q_1 = (0)$
$q_2 = (1)$

状態遷移関数

$\boxed{Q' = x}$

現状態 q		次状態q' 入力 x 0	次状態q' 入力 x 1	出力y 入力 x 0	出力y 入力 x 1
q_1	0	0	1	0	0
q_2	1	0	1	1	0

（ⅴ） 使用する記憶回路の特性表より、それぞれの次状態 q'を得るのに必要な記憶回路の入力状態 u を求める。

順序回路の実現（冗長な状態が無い場合） 1→0識別回路

現状態 q		次状態q' 入力 x 0	次状態q' 入力 x 1	出力y 入力 x 0	出力y 入力 x 1
q_1	0	0	1	0	0
q_2	1	0	1	1	0

遷移先　入力

$Q \to Q'$	D	$S\ R$	$J\ K$	T
$0 \to 0$	0	$0\ \varphi$	$0\ \varphi$	0
$0 \to 1$	1	$1\ 0$	$1\ \varphi$	1
$1 \to 0$	0	$0\ 1$	$\varphi\ 1$	1
$1 \to 1$	1	$\varphi\ 0$	$\varphi\ 0$	0

制御入力表
:状態遷移表の次状態を、その状態を発生するフリップフロップの入力状態で表した表をつくる。

まずD-FF　Q=0で x=0ならば、Q=0に、x=1ならば、Q=1に、なる。
　　　　　Q=1で x=0ならば、Q=1に、x=0ならば、Q=1に、なる。

Q	D 0	D 1	S 0	S 1	R 0	R 1	J 0	J 1	K 0	K 1	T 0	T 1
0	0	1										
1	0	1										

$d = x$

順序回路の実現（冗長な状態が無い場合） 1→0識別回路

現状態 q		次状態q' 入力 x 0	次状態q' 入力 x 1	出力y 入力 x 0	出力y 入力 x 1
q_1	0	0	1	0	0
q_2	1	0	1	1	0

遷移先　入力

$Q \to Q'$	D	$S\ R$	$J\ K$	T
$0 \to 0$	0	$0\ \varphi$	$0\ \varphi$	0
$0 \to 1$	1	$1\ 0$	$1\ \varphi$	1
$1 \to 0$	0	$0\ 1$	$\varphi\ 1$	1
$1 \to 1$	1	$\varphi\ 0$	$\varphi\ 0$	0

制御入力表
:状態遷移表の次状態を、その状態を発生するフリップフロップの入力状態で表した表をつくる。

SR-FF　Q=0で x=0ならば、Q=0に、x=1ならば、Q=1に、なる。
　　　　Q=1で x=0ならば、Q=0に、x=1ならば、Q=1に、なる。

Q	D 0	D 1	S 0	S 1	R 0	R 1	J 0	J 1	K 0	K 1	T 0	T 1
0	0	1	0	1	φ	0						
1	0	1	0	φ	1	0						

$d = x \quad s = x \quad r = \bar{x}$

順序回路の実現（冗長な状態が無い場合） 1→0識別回路

現状態 q		次状態q' 入力 x 0	次状態q' 入力 x 1	出力y 入力 x 0	出力y 入力 x 1
q_1	0	0	1	0	0
q_2	1	0	1	1	0

遷移先　入力

$Q \to Q'$	D	$S\ R$	$J\ K$	T
$0 \to 0$	0	$0\ \varphi$	$0\ \varphi$	0
$0 \to 1$	1	$1\ 0$	$1\ \varphi$	1
$1 \to 0$	0	$0\ 1$	$\varphi\ 1$	1
$1 \to 1$	1	$\varphi\ 0$	$\varphi\ 0$	0

制御入力表
:状態遷移表の次状態を、その状態を発生するフリップフロップの入力状態で表した表をつくる。

JK-FF　Q=0で x=0ならば、Q=0に、x=1ならば、Q=1に、なる。
　　　　Q=1で x=0ならば、Q=0に、x=1ならば、Q=1に、なる。

Q	D 0	D 1	S 0	S 1	R 0	R 1	J 0	J 1	K 0	K 1	T 0	T 1
0	0	1	0	1	φ	0	0	1	φ	φ		
1	0	1	0	φ	1	0	φ	φ	1	0		

$d = x \qquad s = x, r = \bar{x} \qquad j = x, k = \bar{x}$

順序回路の実現（冗長な状態が無い場合） 1→0識別回路

現状態 q		次状態q' 入力 x 0	次状態q' 入力 x 1	出力y 入力 x 0	出力y 入力 x 1
q_1	0	0	1	0	0
q_2	1	0	1	1	0

遷移先 $Q \to Q'$	入力 D	S	R	J	K	T
$0 \to 0$	0	0	φ	0	φ	0
$0 \to 1$	1	1	0	1	φ	1
$1 \to 0$	0	0	1	φ	1	1
$1 \to 1$	1	φ	0	φ	0	0

制御入力表
:状態遷移表の次状態を、その状態を発生するフリップフロップの入力状態で表した表をつくる。

T-FF　Q=0で　x=0ならば、Q=0に、x=1ならば、Q=1に、なる。
　　　Q=1で　x=0ならば、Q=0に、x=1ならば、Q=1に、なる。

Q	D		S		R		J		K		T	
	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
0	0	1	0	1	φ	0	0	1	φ	φ	0	1
1	0	1	0	φ	1	0	φ	φ	1	0	1	0

$d = x$　　$s = x, r = \bar{x}$　　$j = x, k = \bar{x}$　　$t = x \bullet \bar{q} + \bar{x} \bullet q$

順序回路の実現（冗長な状態が無い場合）

	2進カウンタを作るには、	1→0識別回路を作るには、
D-FFなら	$d = x \bullet \bar{q} + \bar{x} \bullet q$	$d = x$
SR-FFなら	$s = x \bullet \bar{q}$　$r = x \bullet q$	$s = x, r = \bar{x}$
JK-FFなら	$j = k = x$	$j = x, k = \bar{x}$
T-FFなら	$t = x$	$t = x \bullet \bar{q} + \bar{x} \bullet q$

という入力を入れる。

作る回路によって、得手・不得手があるが、
D-FFは状態遷移関数を簡単にする状態割当で簡単になる。