



アルゴリズムとデータ構造III

12回目: 1月8日(木)

全文検索アルゴリズム
(Aho-Corasick)

暗号: 符号化: テキスト圧縮

授業資料 <http://ir.cs.yamanashi.ac.jp/~ysuzuki/algorithm3/index.html>

授業の予定(中間試験まで)

1	10/02	スタック(後置記法で書かれた式の計算)
2	10/09	チューリング機械, 文脈自由文法
3	10/16	構文解析 CYK法
4	10/23	構文解析 CYK法
5	10/30	構文解析(チャート法), グラフ(ダイクストラ法)
6	11/06	構文解析(チャート法), グラフ(ダイクストラ法, DPマッチング)
7	11/13	グラフ(DPマッチング, A*アルゴリズム)
8	11/20	グラフ(A*アルゴリズム), 前半のまとめ
9	11/27	中間試験

授業の予定(中間試験以降)

10	12/04	全文検索アルゴリズム (simple search, KMP)
11	12/18	全文検索アルゴリズム (BM, Aho-Corasick)
12	01/08	全文検索アルゴリズム (Aho-Corasick), データ 圧縮
13	01/15	暗号 (黄金虫, 踊る人形) 符号化 (モールス信号, Zipfの法則, ハフマン 符号) テキスト圧縮
14	01/29	テキスト圧縮 (zip), 音声圧縮 (ADPCM, MP3, CELP), 画像圧縮 (JPEG)
15	02/05	期末試験



本日のメニュー

- 全文検索アルゴリズム
 - Aho-Corasickの続き
- 暗号
 - 黄金虫 (The gold bug)
 - 踊る人形 (The Adventure of the Dancing Men)
- 符号化
- テキスト圧縮



全文検索

- 文書中から、与えられた文字列と完全に一致する部分を探し出す.
- 全文検索の種類
 - 文字列照合による全文検索
 - 索引を用いた全文検索

文字列照合タスク

- テキスト処理には不可欠
- テキスト文字列からキーワードとその出現位置を見つける
- 例
 - テキスト文字列: aabcdabdabbabcdabacade
 - キーワード: abcaba

a	b	c	a	b	c	a	b	a	b	c	a	b	a	b	x	a	b	c	a
			a	b	c	a	b	a											
								a	b	c	a	b	a						



文字列照合アルゴリズム

- Simple Search
- Knuth-Morris-Pratt法
- Boyer-Moore法
- Aho-Corasick法

文字列照合問題の単純な解決法

Simple Search

- Simple Searchの文字列照合手順
- Simple Searchのアルゴリズム
- Simple Searchの評価

Simple Search 同じ部分を何度も照合しなければならない

位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2
text	a	b	c	a	b	c	a	b	a	b	c	a	b	a	b	x	a	b	c	a	b	x
	a	b	c	a	b	a																
		a																				
			a																			
				a	b	c	a	b	a													
					a																	
						a																
							a	b	c													
								a														
									a	b	c	a	b	a								
										a												
											a											
												a	b	c								
照合回数	1	2	2	2	3	3	2	3	3	2	2	2	2	2								

照合失敗

文字列照合成功

Simple Searchのアルゴリズム

- 入力: テキスト文字列 text, キーワード key
- 出力: テキスト文字列中のキーワードの位置
- m: テキスト文字列の長さ
- n: キーワードの長さ

Method
begin

```
for i:=1 to m-n+1 do
```

起点を決めて

```
begin
```

```
for j:=1 to n do
```

キーワードと1字ずつ照合

```
if text[i+j-1]≠key[j] then
```

```
goto 1;
```

```
print i;
```

```
1:
```

```
end
```

```
end
```

Simple Search 最も効率の悪い

場合

文字照合回数 $(7-3+1)*3=15$

$(m-n+1)*n$ 回

一般に $m \gg n$ なので $O(mn)$

■ key = aaa

■ text = aaaaaaa

位置	1	2	3	4	5	6	7
text	a	a	a	a	a	a	a
	a	a	a				
		a	a	a			
			a	a	a		
				a	a	a	
					a	a	a
照合回数	1	2	3	3	3	2	1



Knuth-Morris-Pratt法 (KMP法)

- Simple Search

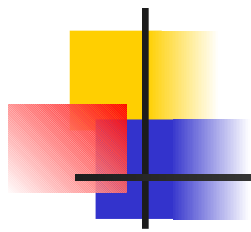
- テキストストリング中の各文字がキーワードと複数回照合される → 冗長

- KMP法

- 文字照合の実行中に次回の文字照合を考慮しつつ処理を進める
- 文字照合中, バックトラックが必要ない

Knuth-Morris-Pratt法

Key: a b c a b a
 1 2 3 4 5 6
 next 0 1 1 0 1 3 2



位置 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2
 text a b c a b c a b a b c a b a b x a b c a b x
 a b c a b a

1 2 ← キーワードの2文字目に対応している

a b c a b a
 1 2 1

3から

a b c a b a
 1 2 1

2から

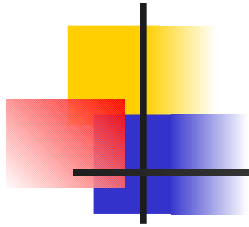
a b c
 a

2から

1から

a b c a b a
 1 2

KMP法 アルゴリズム



Method kmp

begin

 j:=1;

 for i:=1 to m do

 begin

 while j>0 and key[j] ≠text[i] do

照合

 j:=next(j); つぎの照合位置

 if j=n then

 print i-n+1:

照合成功

 j:=j+1;

 end

end

m :textの長さ

n :keywordの長さ

i: textの照合位置

J: keywordの照合位置

キーワードの接頭辞文字列の出現位置

関数next: 次回の照合でキーワードの何文字目を照合すべきか
テキストstring中の照合に失敗した文字の直前の何文字が
キーワードの接頭辞になっているかを調べる

位置	1	2	3	4	5	6	7				
キーワード	a	b	c	a	b	a					
				a	b	c	a	b	a		
6文字目で照合失敗した場合: 直前文字列がabなので3文字目から照合開始											
						a	b	c	a	b	a
照合に成功した場合: 直前文字がaなので2文字目から照合開始											
next関数値	0	1	1	0	1	3	2				

next関数

Keyword: abcabaのとき a:1 : keywordの一文字目のa
123456 a : a以外の文字

1文字目のaで照合失敗（直前の文字がa）

→ 照合失敗箇所の右隣とa:1を照合

→ 照合失敗箇所はキーワードの0文字目と照合 →
next(1)=0

2文字目のbで照合失敗（直前の文字がab）

→ 照合失敗箇所とa:1を照合 → next(2)=1

3文字目のcで照合失敗（直前の文字がabc）

→ 照合失敗箇所とa:1を照合 → next(3)=1

next関数

Keyword: abcabaのとき a:1 : keywordの一文字目のa
123456 a : a以外の文字

4文字目のaで照合失敗（直前の文字がabca）

→ 照合失敗箇所の右隣とa:1を照合

→ 照合失敗箇所はキーワードの0文字目と照合 →

next(4)=0

5文字目のbで照合失敗（直前の文字がabcabb）

→ 照合失敗箇所とa:1を照合 → next(5)=1

6文字目のaで照合失敗（直前の文字がabcaba）

→ 照合失敗箇所とc:3を照合 → next(6)=3

6文字目のaで照合**成功**（直前の文字がabcaba）

→ 照合失敗箇所（照合成功末尾の右隣）とb:2を照合 →

next(7)=2

KMP法 アルゴリズム next関数

入力: キーワード key, 出力: next関数

Method next

begin

t:=0;

next(1):=0;

for j:=1 to n do keyの各文字に対してnext関数値を計算

begin

while t ≠ 0 and key[j] ≠ key[t] do

t:=next(t); keyのj文字目までの文字列がkeyの

t:=t+1;

接頭辞と一致しているか調べる

if key[j+1]=key[t] then

next(j+1):=next(t);

keyの

j+1文字目の

else

next(j+1):=t;

next関数値を

決定

end

end

n : keyの長さ

j : keyの照合位置

t : keyのj文字目の直前の何文字がkeyの接頭辞になっているか



KMP法の評価

- KMP法

- 漸近的時間計算量 $O(m)$

- next関数が必要

テキスト文字列の各文字に対して1回照合

- Simple Search法

- 漸近的時間計算量 $O(mn)$

テキスト文字列の各文字に対して
キーワード文字数回照合

m: テキスト文字列数

n: キーワード文字列数

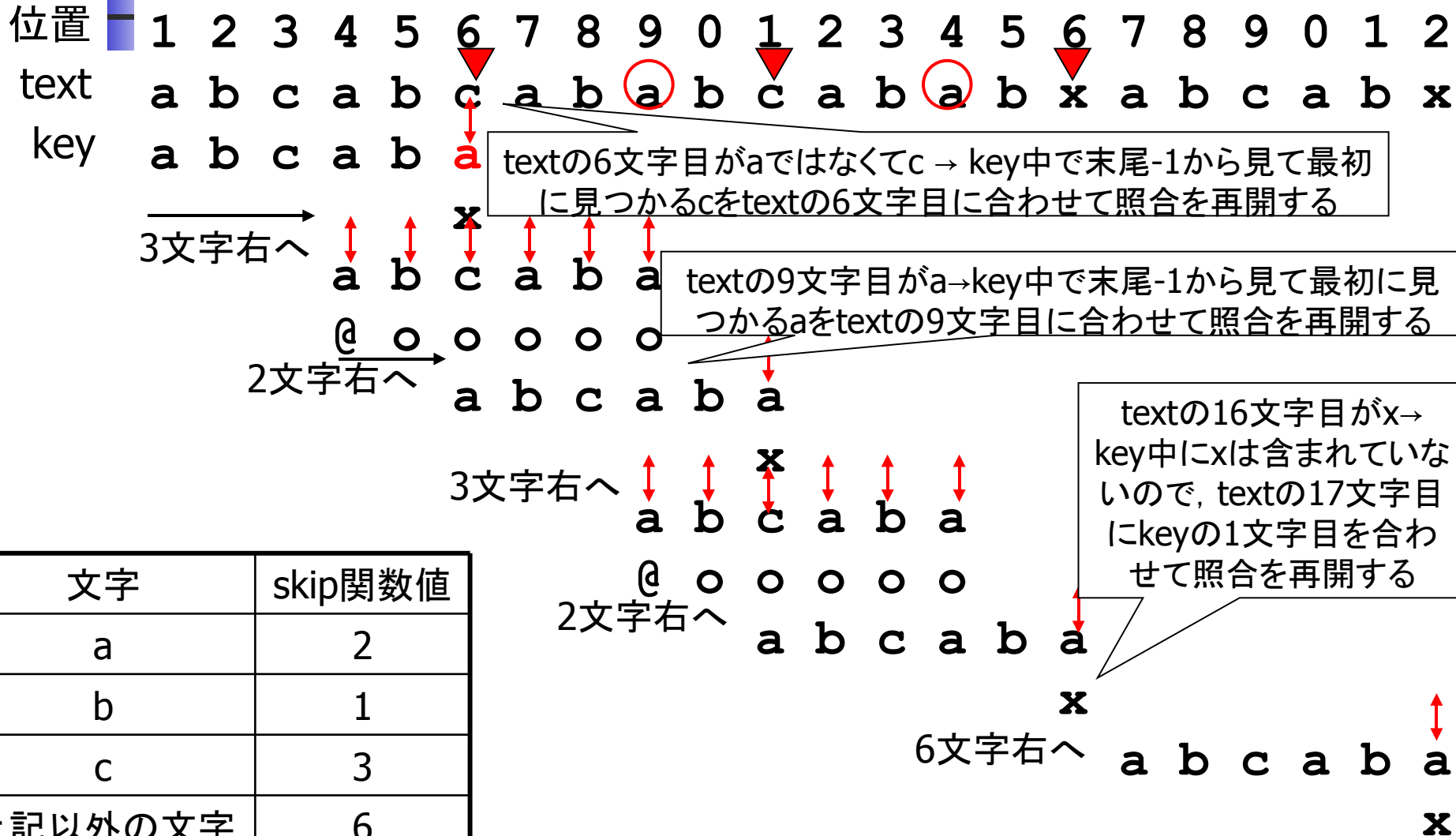


Boyer-Moore法

- キーワードの末尾から照合を行う.
- キーワードの末尾と照合したテキストストリングの文字を覚えておく
- その文字とキーワードの文字が一致するまでキーワードをずらす

Boyer-Moore法

Key: a b c a b a



skip関数

- テキスト文字列中の照合文字cが、キーワードの末尾から何文字目にあるか

?????a
abcaba
6543**2**10

?????b
abcaba
65432**1**0

?????c
abcaba
654**3**210

?????x
abcaba
6543210

キーワード"abcaba"に対するskip関数

文字	skip関数値
a	2
b	1
c	3
上記以外の文字	6

BM法による文字列照合

Method BM

begin

pos:=n;

while pos<=m do

begin

if text[pos]=key[n] then

begin

k:=pos-1;

j:=n-1;

while j>0 and text[k]=key[j] do

begin

k:=k-1;

j:=j-1;

end

if j=0 then

print k+1;

end

pos:=pos+skip(text[pos]);

end

end

m :textの長さ

n :keywordの長さ

J: keywordの照合位置

pos: text中の照合位置

BM法による文字列照合

skip関数

入力: キーワード key

出力: skip関数

文字種: p~q

n: keyの長さ

Method skip

begin

```
for i:=p to q do
```

```
    skip(i) := n;
```

```
for i:=1 to n-1 do
```

```
    skip(key[i]) := n-i;
```

end

初期設定(全ての文字種で
keyの長さだけskip)

Keyに含まれる文字種の場合
keyの先頭から末尾まで調べて
最後に見つかった位置をkey
の長さから引いた数だけskip
する



BM法の評価

- 最良の場合 m/n 回の文字照合
textの文字 \cap keyの文字 = \emptyset
- 最悪の場合 $m*n$ 回の文字照合
textの文字 = keyの文字 = $\{a\}$
- キーワードが長いほど高速
 - keyに含まれない文字がtextに出現したときにkeyの長さだけスキップできる
- 文字種類数が少ないほど遅くなる
 - text中の文字がkey中に現れる確率が高くなる → 遅くなる



Aho-Corasick法

- マシンAC
- AC法の文字列照合手順
- AC法の文字列照合アルゴリズム
- AC法の評価
- マシンACの構成方法



Aho-Corasick法

- 文書中から**複数**のキーワードを検索するための手法
- テキストストリングをバックトラックすることなく**1回走査するだけ**で、複数のキーワードを同時に検出することができる
- goto関数, failure関数, output関数により構成される

goto関数, failure関数, output関数

■ goto関数

- ある状態で文字xが入力されたときに遷移する状態

■ failure関数

- goto関数からfailが返された際の照合ポインタの移動先

■ output関数

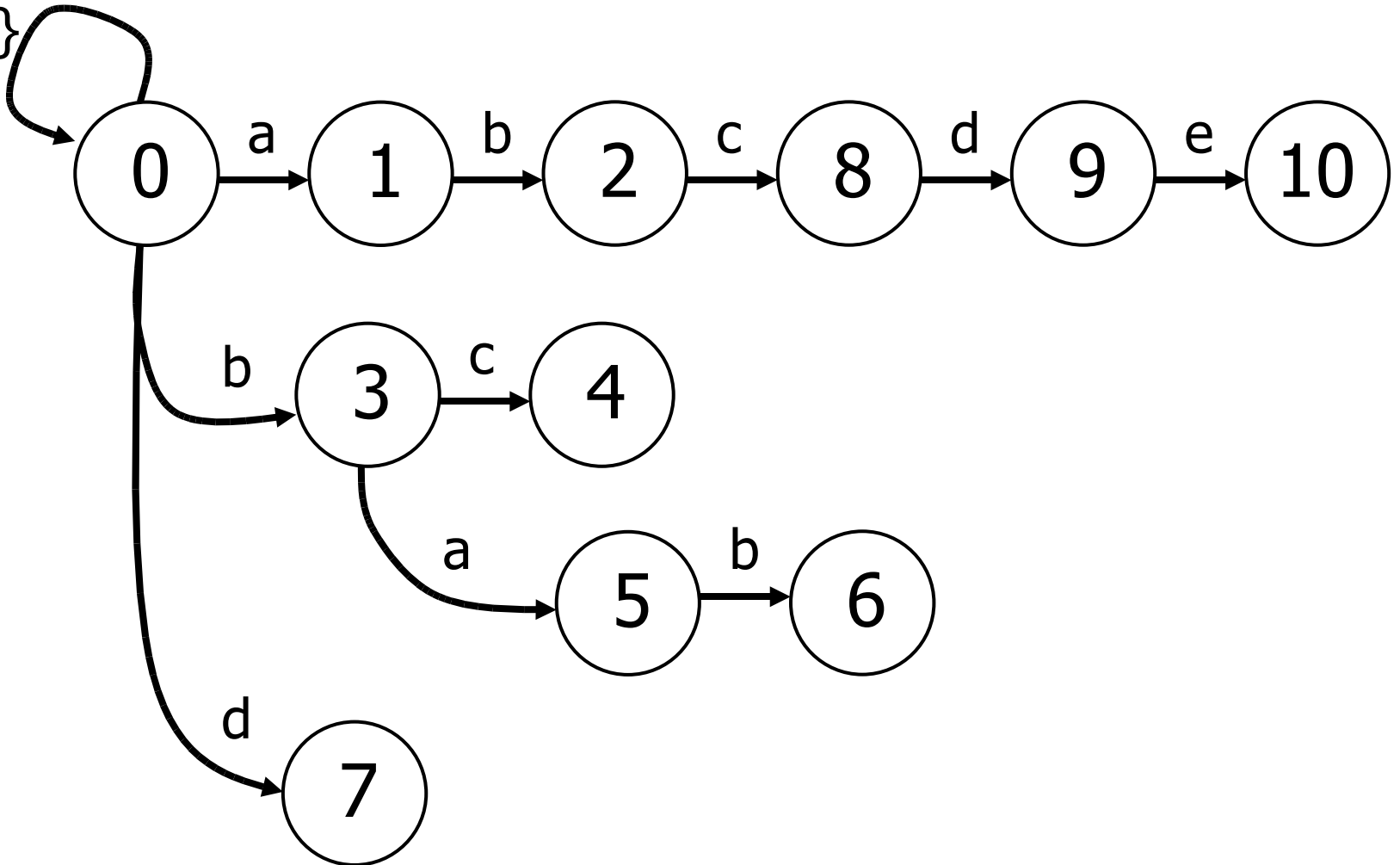
- ある状態に遷移したときに検出できるキーワード

キーワード

{ "ab", "bc", "bab", "d", "abcde" }

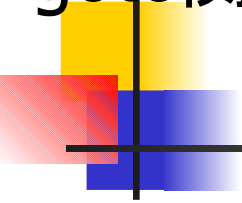
ある状態で文字xが入力されたときに遷移する状態

$\neg\{a,b,d\}$



マシンAC failure関数

goto関数からfailが返された際の照合ポイントの移動先



s	f(s)
1	0
2	3
3	0
4	0
5	1
6	2
7	0
8	4
9	7
10	0

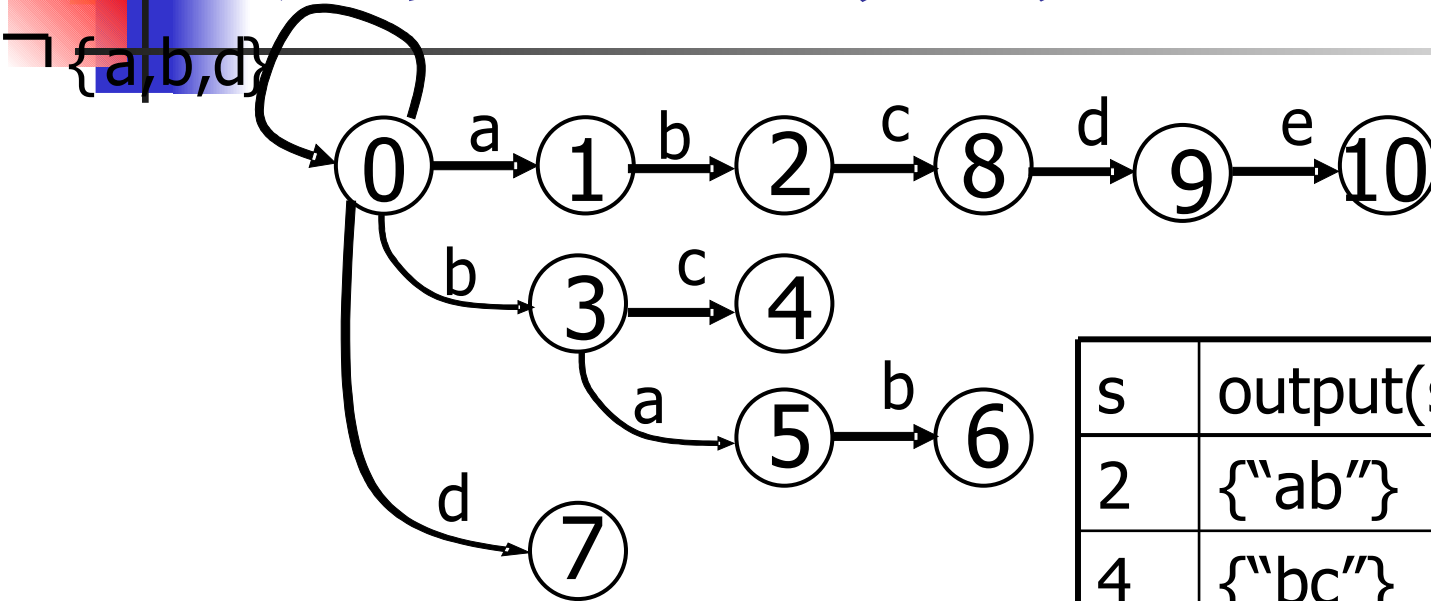
マシンAC output関数

ある状態に遷移したときに検出できるキーワード

s	output(s)
2	{"ab"}
4	{"bc"}
6	{"bab", "ab"}
7	{"d"}
8	{"bc"}
9	{"d"}
10	{"abcde"}

照合ポインタの遷移

テキストストリング "xbabcde"



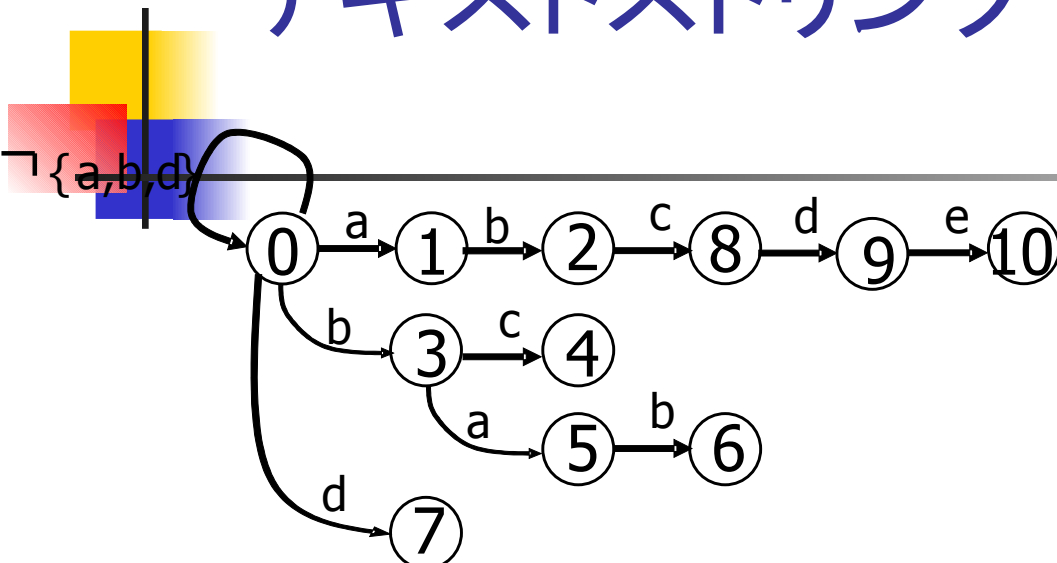
keyword
"ab", "bc", "bab", "d", "abcde"

s	output(s)
2	{"ab"}
4	{"bc"}
6	{"bab", "ab"}
7	{"d"}
8	{"bc"}
9	{"d"}
10	{"abcde"}

s	f(s)
1	0
2	3
3	0
4	0
5	1
6	2
7	0
8	4
9	7
10	0

照合ポインタの遷移

テキストストリング "xbabcde"



s	output(s)
2	{"ab"}
4	{"bc"}
6	{"bab", "ab"}
7	{"d"}
8	{"bc"}
9	{"d"}
10	{"abcde"}

s	f(s)
1	0
2	3
3	0
4	0
5	1
6	2
7	0
8	4
9	7
10	0

keyword

"ab", "bc", "bab", "d", "abcde"

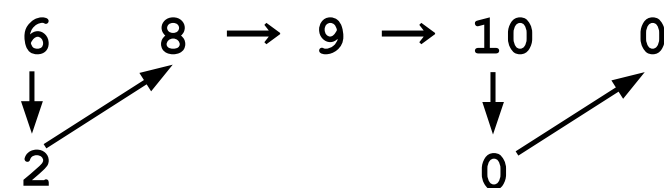
入力文字

x b a b c d e x

goto関数による遷移

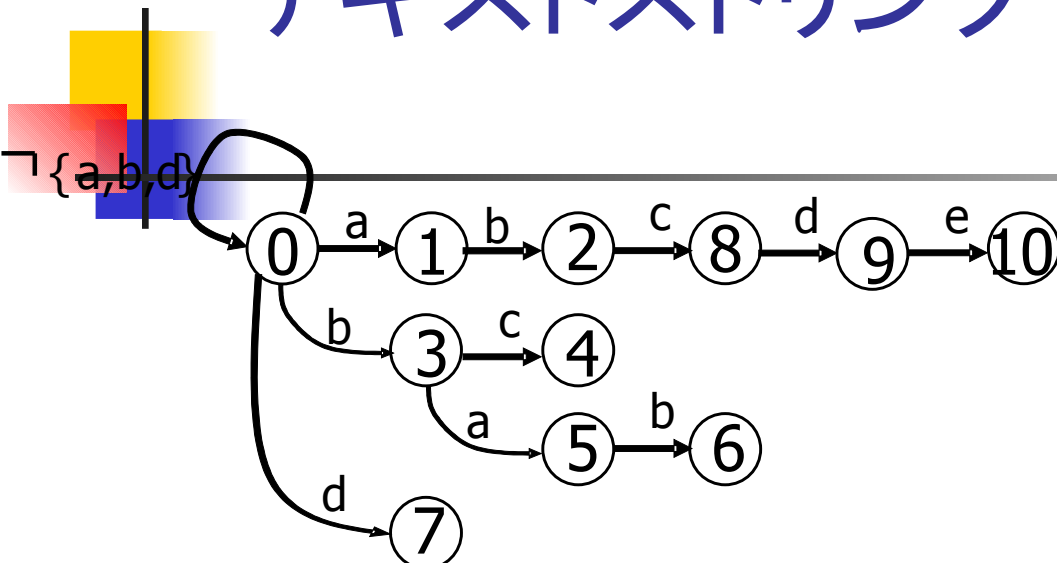
0 → 0 → 3 → 5 → 6 → 8 → 9 → 10 → 0

failure関数による遷移



練習問題 照合ポインタの遷移

テキストストリング "abcdbcba"



s	output(s)
2	{"ab"}
4	{"bc"}
6	{"bab", "ab"}
7	{"d"}
8	{"bc"}
9	{"d"}
10	{"abcde"}

s	f(s)
1	0
2	3
3	0
4	0
5	1
6	2
7	0
8	4
9	7
10	0

keyword
 "ab", "bc", "bab", "d", "abcde"

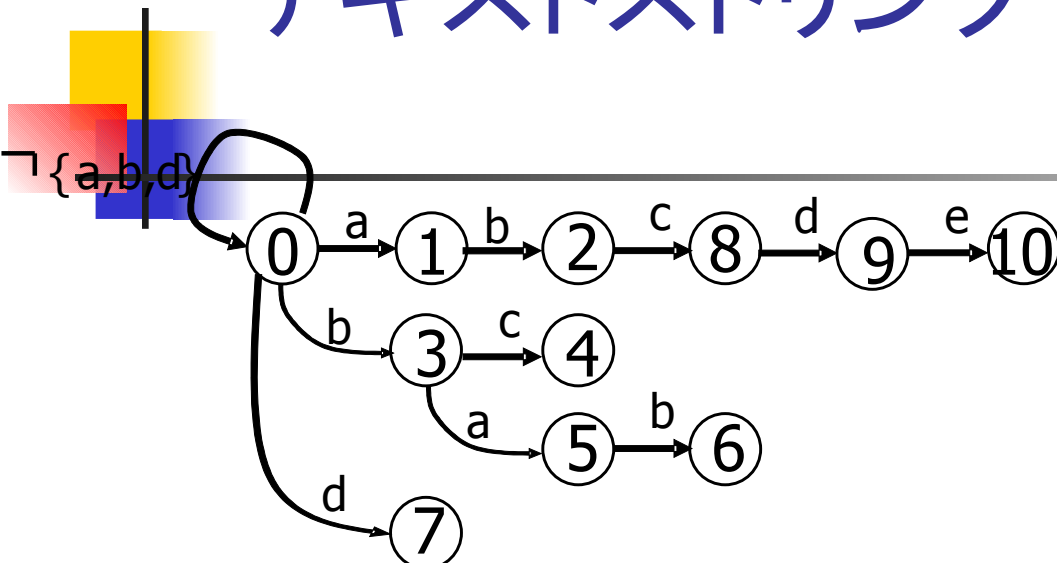
入力文字 a b c d b c b a

goto関数による遷移

failure関数による遷移

練習問題 照合ポインタの遷移

テキストストリング "abcdbcba"



s	output(s)
2	{"ab"}
4	{"bc"}
6	{"bab", "ab"}
7	{"d"}
8	{"bc"}
9	{"d"}
10	{"abcde"}

s	f(s)
1	0
2	3
3	0
4	0
5	1
6	2
7	0
8	4
9	7
10	0

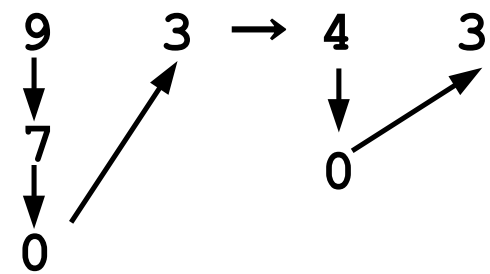
keyword
 "ab", "bc", "bab", "d", "abcde"

入力文字

a b c d b c b a

goto関数による遷移 0 → 1 → 2 → 8 → 9 → 3 → 4 → 3 → 5

failure関数による遷移

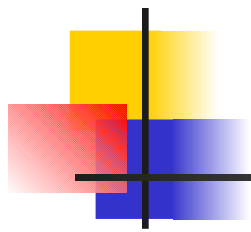




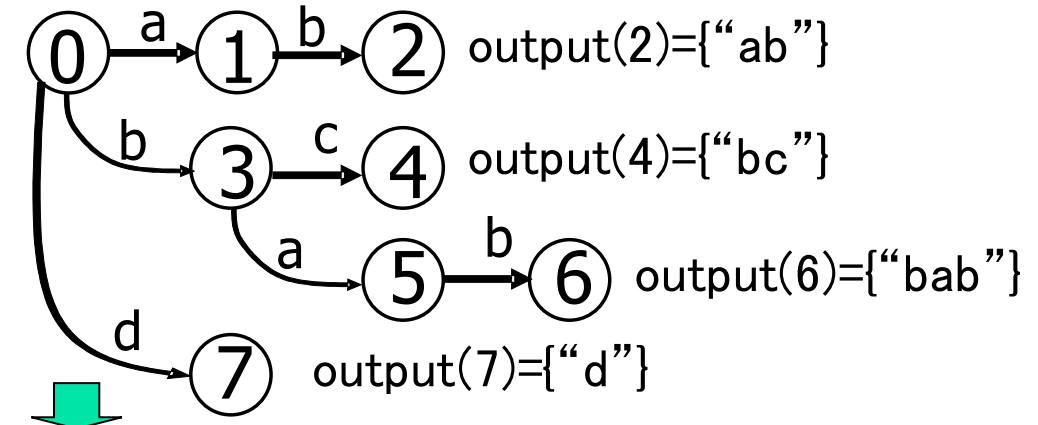
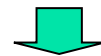
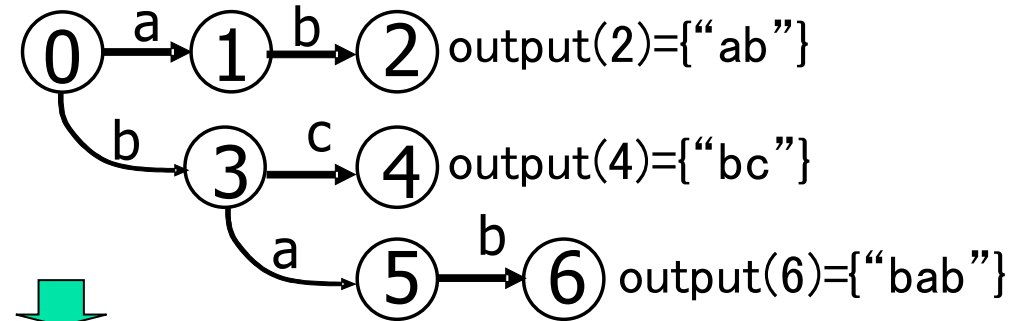
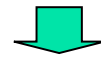
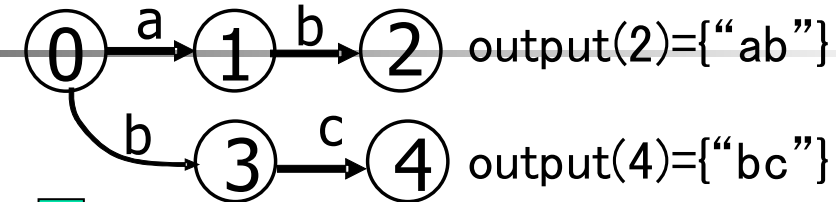
マシンACの構成方法

- goto関数とoutput関数の構成方法
- failure関数の構成方法

goto関数とoutput関数の構成方法 1/2



keyword
"ab" (2)
"bc" (4)
"bab" (6)
"d" (7)
"abcde" (10)



goto関数とoutput関数の構成方法 2/2

keyword

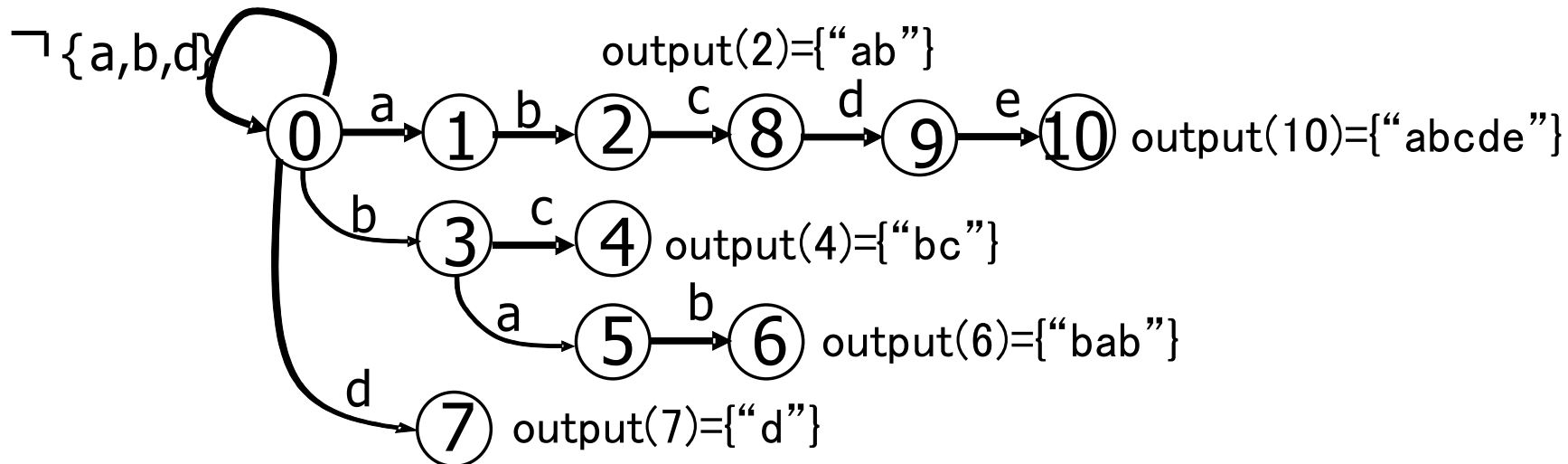
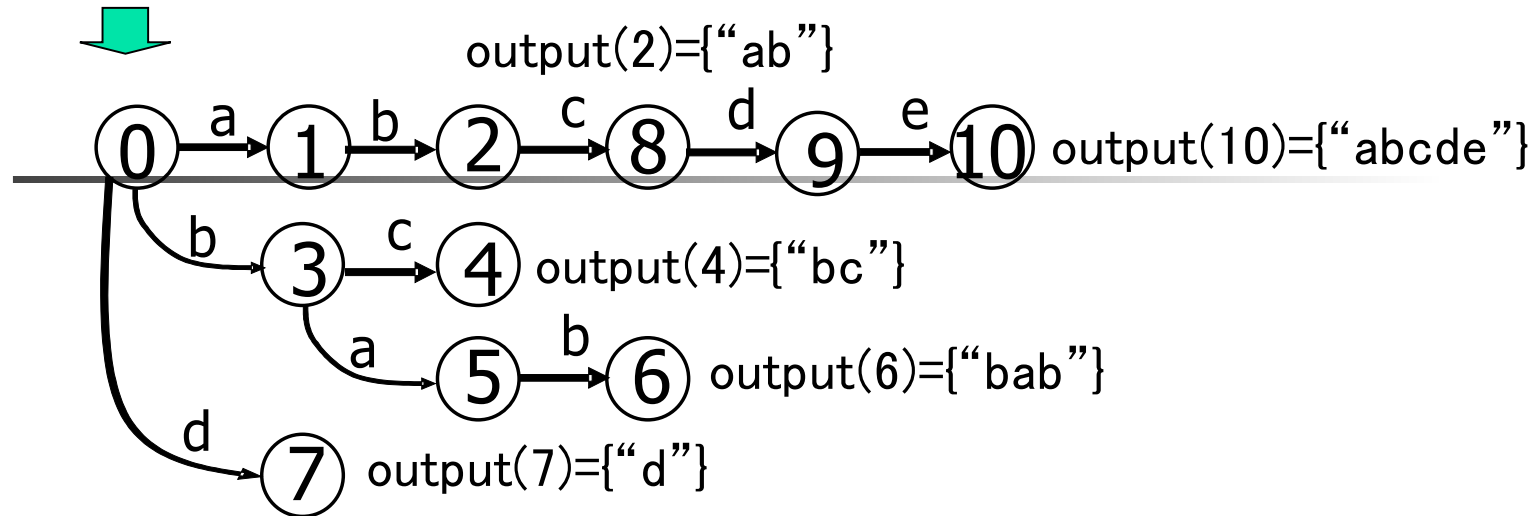
"ab"

"bc"

"bab"

"d"

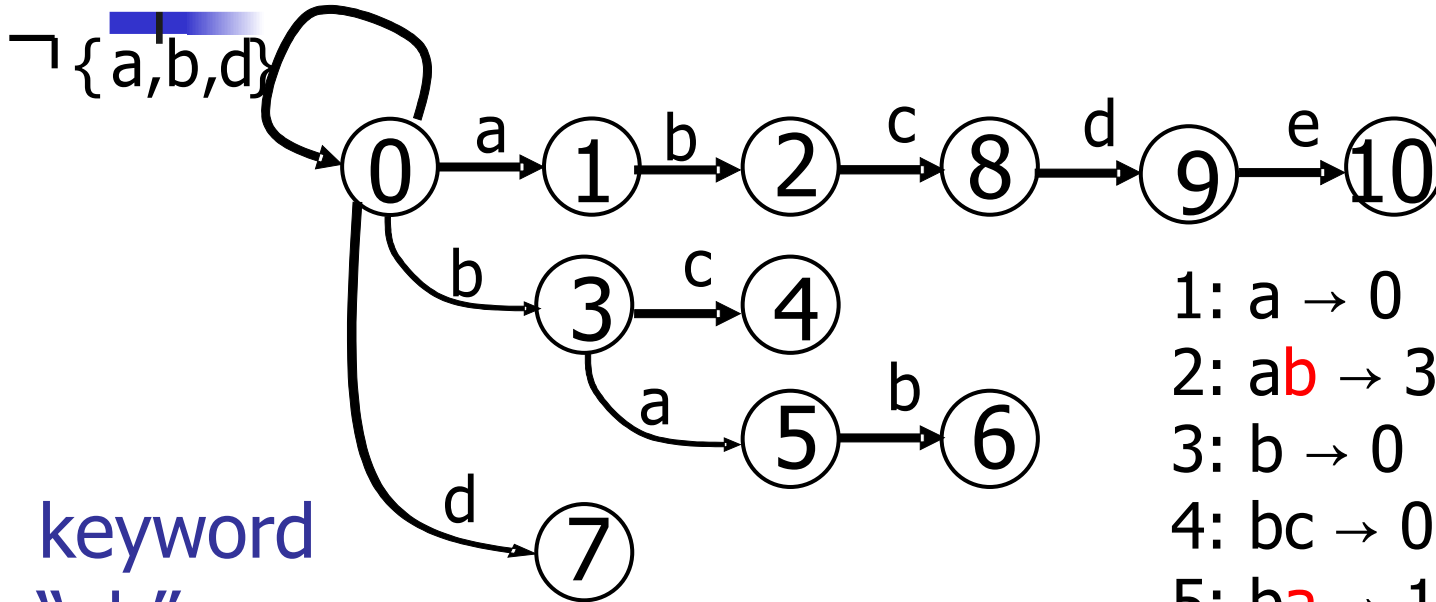
"abcde"



failure関数の構成方法

状態sのfailure関数

$f(s)=q$ | ACstring[q]がACstring[s]の最長の接尾辞になる状態q



keyword
"ab"
"bc"
"bab"
"d"
"abcde"

- 1: a → 0
- 2: ab → 3
- 3: b → 0
- 4: bc → 0
- 5: ba → 1
- 6: bab → 2
- 7: d → 0
- 8: abc → 4
- 9: abcd → 7
- 10: abcde → 0

babの最長の接尾辞

s	f(s)
1	0
2	3
3	0
4	0
5	1
6	2
7	0
8	4
9	7
10	0



データ圧縮

- 対象データ

- テキスト
- 音声
 - 音楽
 - 話し声
- 画像
- 動画

- 圧縮方式

- 可逆圧縮(ロスレス圧縮)
- 非可逆圧縮(ロッキー圧縮)

モールス信号の符号

- ・(短点)とー(長点)を用いてアルファベットを表現する
- 情報を早く送るための工夫
 - よく使われる文字(例えばe,t)は短い
 - e: ・ (短点1文字)
 - t: ー (長点1文字)
 - あまり使われない文字(例えばqは4文字)は長い
 - q: ーー・ー

モールス信号の符号

- ・(短点)と- (長点:短点3つ分の長さ)を用いてアルファベットを表現する
- 区切り記号
 - 文字の切れ目:短点3つ分の間隔
 - 単語の切れ目:短点7つ分の間隔
- L: ·-·· (LifeカードのCMに使われていた)
- SOS: ··· --- ···