論文紹介

森田 憲一: 可逆コンピューティング：ビリヤードボールでコンピュータが作れるか?, 情報処理, Vol.53, No.5, pp.496–502(2012).

2020年Q3　3年ゼミ

横山哲郎

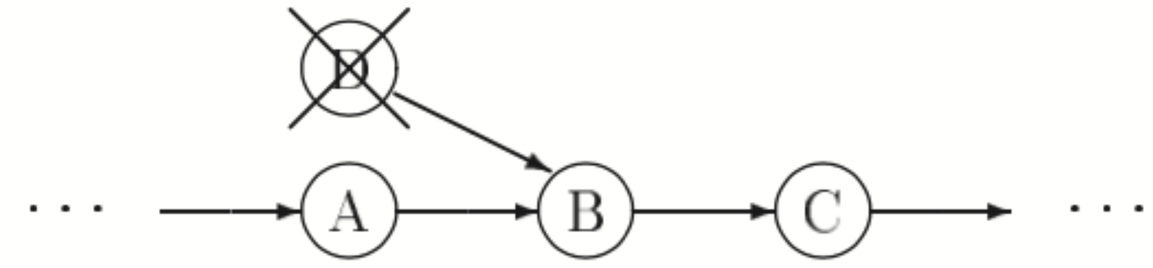
紹介する解説記事

森田 憲一: 可逆コンピューティング：ビリヤードボールでコンピュータが作れるか?, 情報処理, Vol.53, No.5, pp.496–502(2012).

- 「情報処理」に掲載
  - 情報処理学会の会員に毎月送付される雑誌
- 解説記事
  - 前提知識の無くても理解できるように意図された記事

可逆的な計算システム

- そのシステムのどの状態も，
  直前の時刻にとり得る状態を高々1つしかもたないシステム



- 物理的可逆性と密接な関わり
- エネルギー消費の問題に関係
  - IBMの研究者 Landauer が指摘

Landauerの原理

- 非可逆な演算の実行 ⇒ 熱の発生
- 1ビットの情報が消去
  ⇒ kT ln 2のエネルギーが熱として計算機の外部に放出
  (k: ボルツマン定数, T:絶対温度)
- 可逆的な演算では情報が消去されない
  ⇒ 理想的な状況下ではエネルギー消費は0

※ 現在の計算機は情報の消去によらない
エネルギー消費が非常に大きい

微細化に伴い可逆性が重要に

- 現在の電子素子:
  論理値の0と1が多数の電子の平均的振舞いによって表現・区別
  ⇒1つの巨視的状態 に 膨大な微視的状態が対応
- 計算機素子は急速に微細化
  ⇒将来的には論理的状態を少数個の微視的状態で実現可能に
- 微細化が進むと可逆性がエネルギー消費削減の鍵に
- 微視的世界の物理法則(量子力学など)は可逆的
  - 自然法則が計算機に与える制約は？
  - 可逆性は微細化の鍵

可逆計算の理論的計算モデル

- 構成
  - 可逆的な計算機構←可逆的な論理素子←可逆的な物理システム
  - 具体的には：
    可逆チューリング機械(RTM)←可逆論理素子←ビリヤードモデル(BBM)

- 実用的な可逆計算機を実現する道のりは長い
- 可逆計算の世界における新しい設計のアイディアがあり得るのかを説明する

可逆論理素子

- 可逆論理素子 ⇔ その演算・動作を表現する関数が単射
  - 例：論理ゲートNOT, フレドキンゲート，トフォリゲート
  - 反例：ANDゲート　出力0←入力(0,0),(0,1),(1,0)

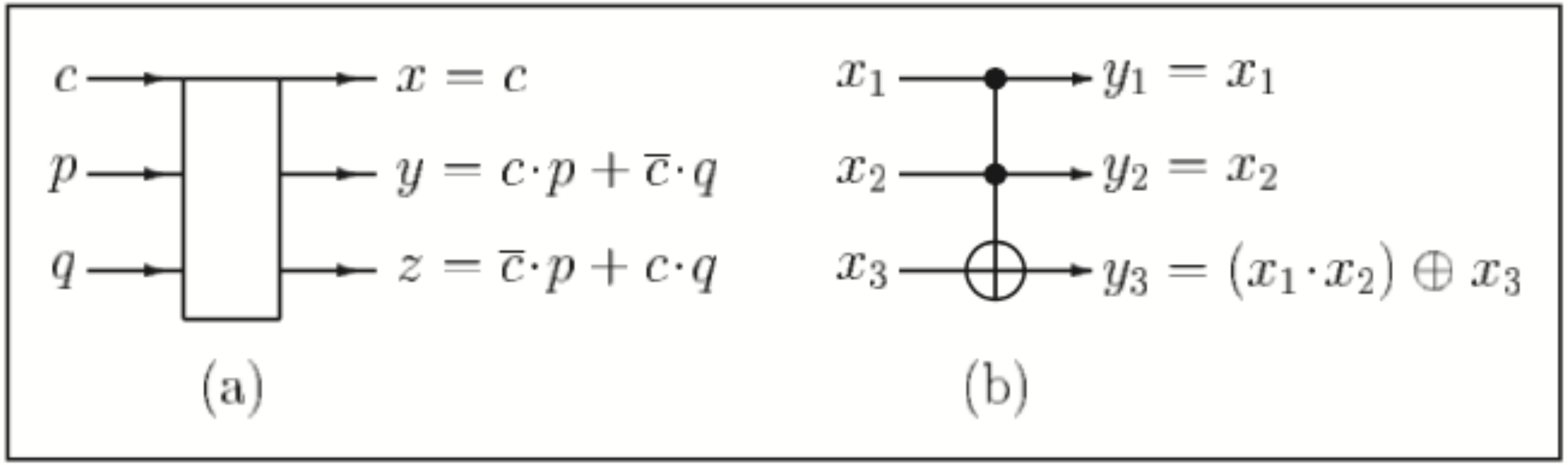


図 -2　(a) フレドキンゲートと (b) トフォリゲート．⊕ は排他的論理和を表す.

フレドキンゲートと
トフォリゲートは万能

- AND, OR, NOTからなる非可逆な論理回路を埋込み可能
- 任意の可逆順序機械(RSM)やRTMを
  これらゲートと記憶素子だけで構成可能

（各自確認してみることを推奨）

ロータリー素子
「記憶素子つき可逆論理回路」

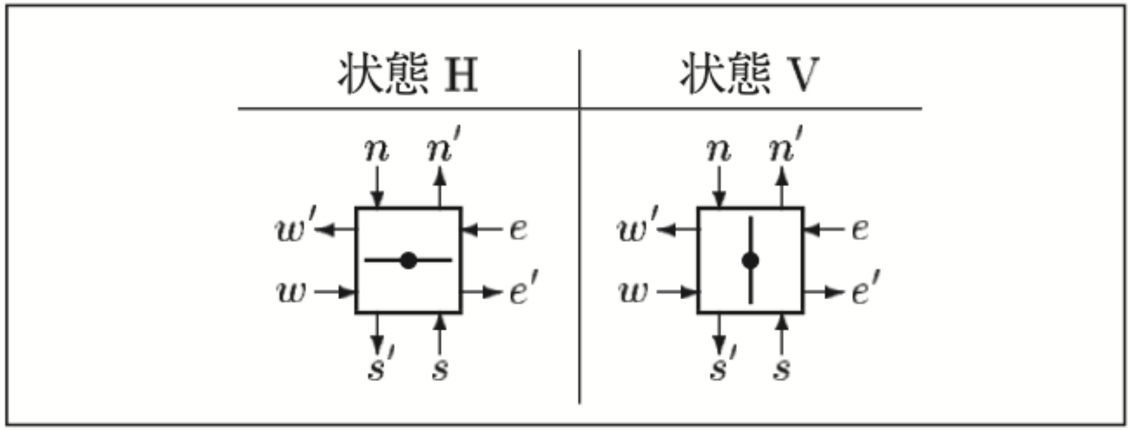


図 -3　ロータリー素子の 2 つの状態を表す概念図

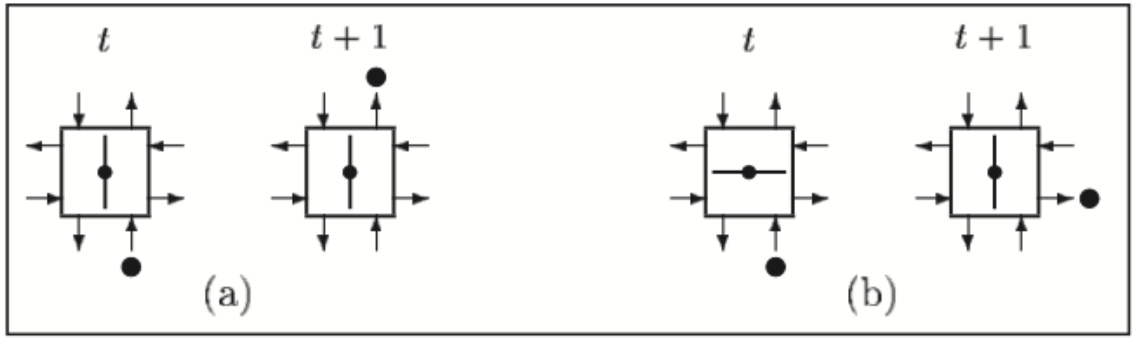


図 -4　ロータリー素子の動作．(a) 粒子が棒と平行に入力された場合と，(b) 棒と垂直の場合．図中の粒子●は時刻 t においては入力，t+1 においては出力と解釈される．

ロータリー素子はRSM

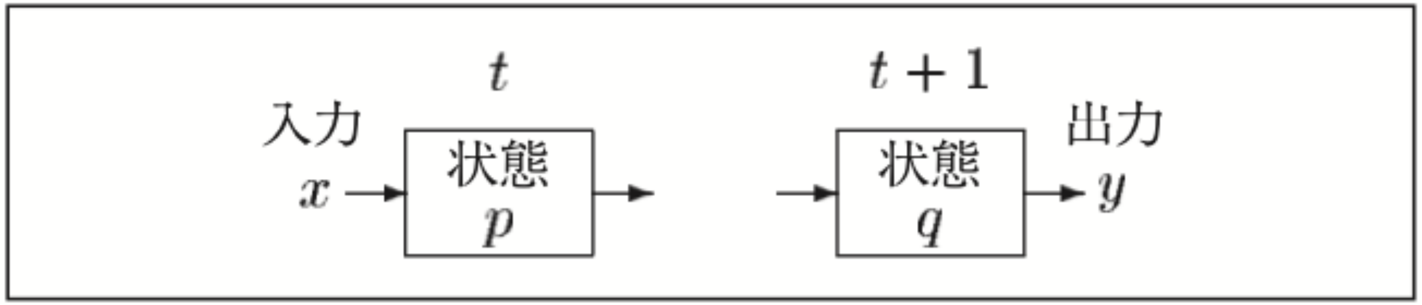


図 -5　順序機械．時刻 t の状態 p と入力 x によって時刻 t+1 の状態 q と出力 y が決まる．

- 出力をもつような有限オートマトン

現在の状態	入力 n	入力 e	入力 s	入力 w
状態 H:	w'	w'	e'	e'
状態 V:	s'	n'	n'	s'

表 -1　ロータリー素子の動作を示す表．現在の状態と入力から次の時刻の状態と出力が定められる．

ビリヤードボールで
可逆論理素子を実現する

- ビリヤードボールモデル (BBM)
  - 弾性衝突する理想的なボールと反射板からなる
- BBMで
  - AND, NOTを実現可
  - フレドキンゲートが実現可
- ロータリー素子はフレドキンゲートと信号の遅延（記憶素子）で実現可
- これとは別に，ロータリー素子を直接的にBBMで実現可

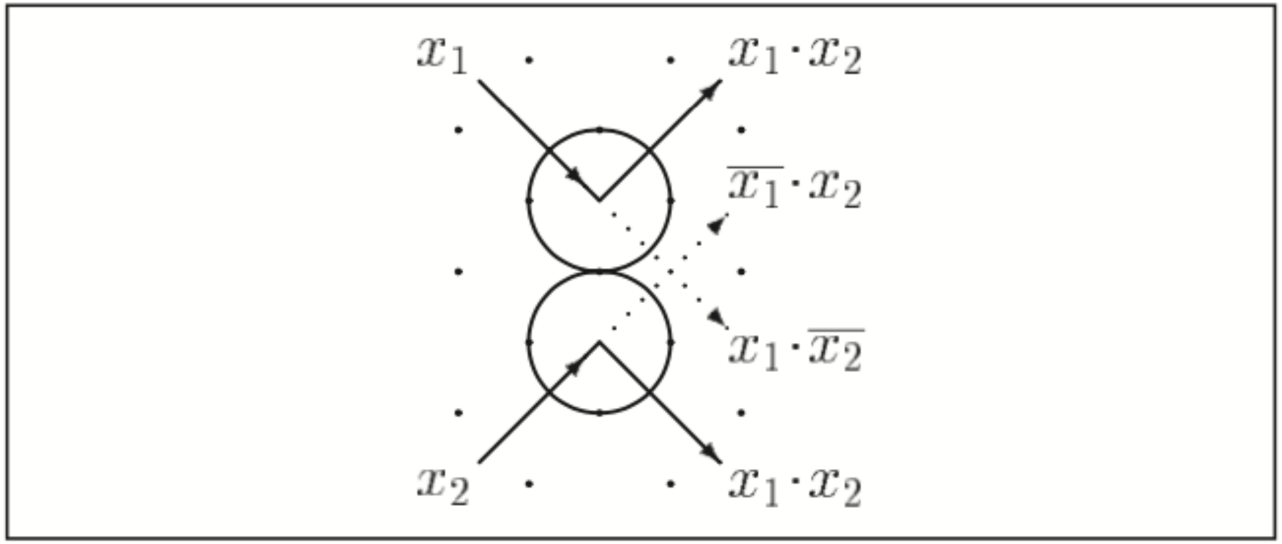
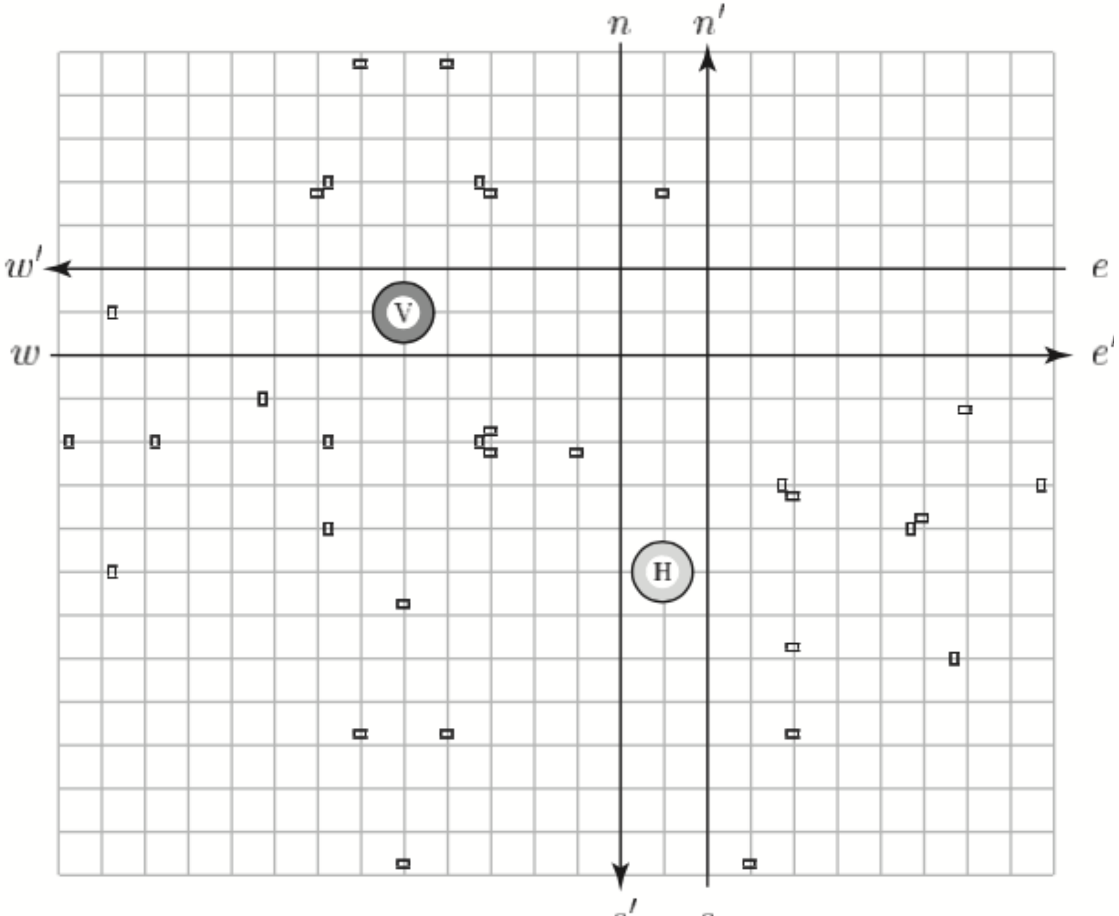
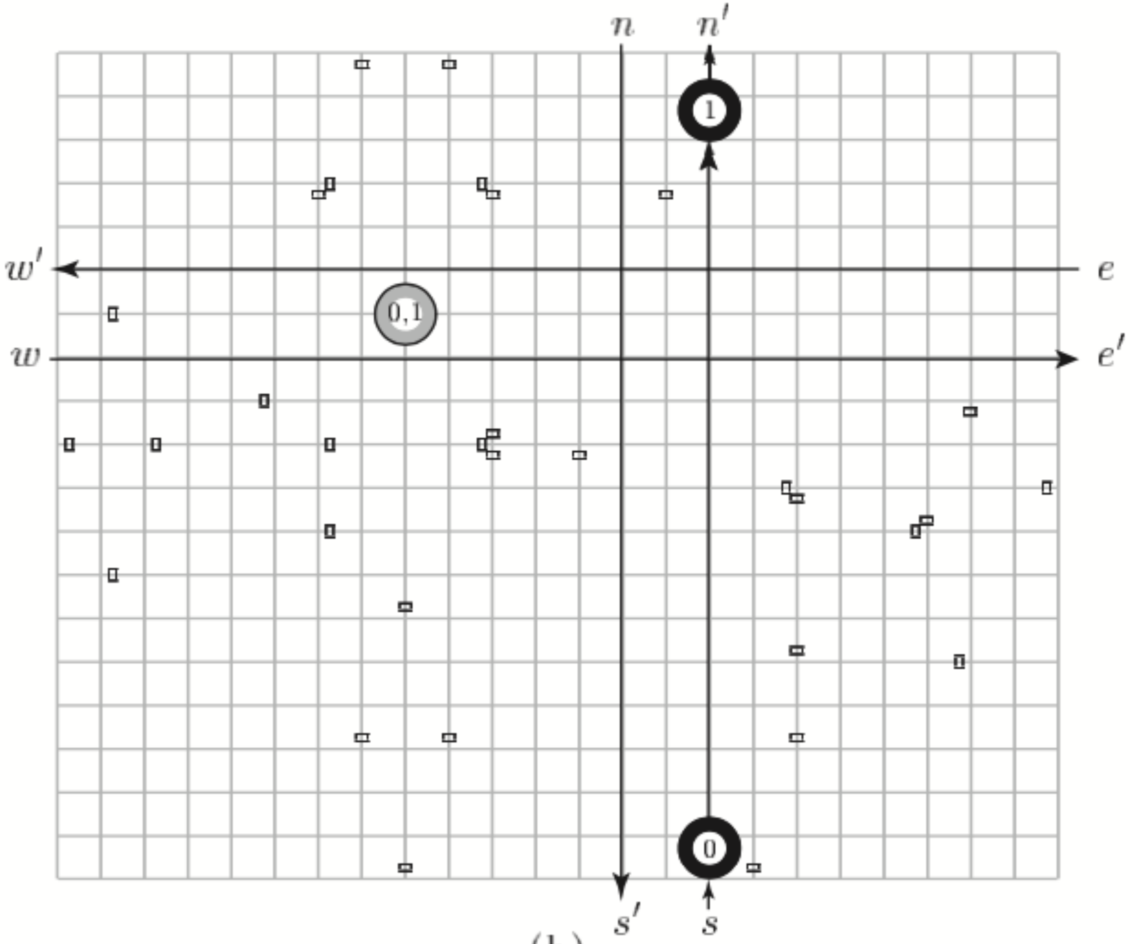


図 -6　可逆的な物理モデルであるビリヤードボールモデルによる相互作用ゲートの実現 [2)]

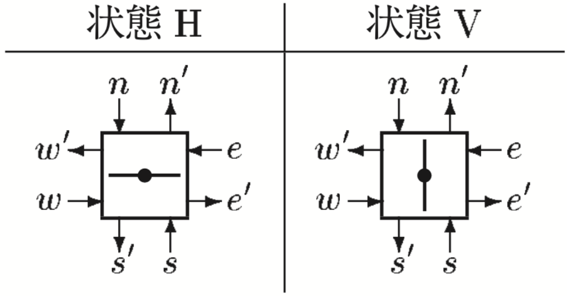


(a)

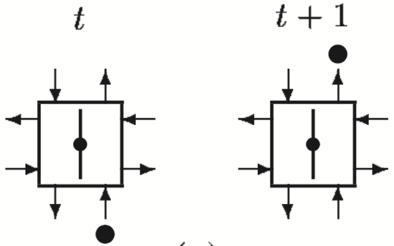


(b)

HとVは静止ボールを置く位置



状態がVで入力がsの場合



(a)

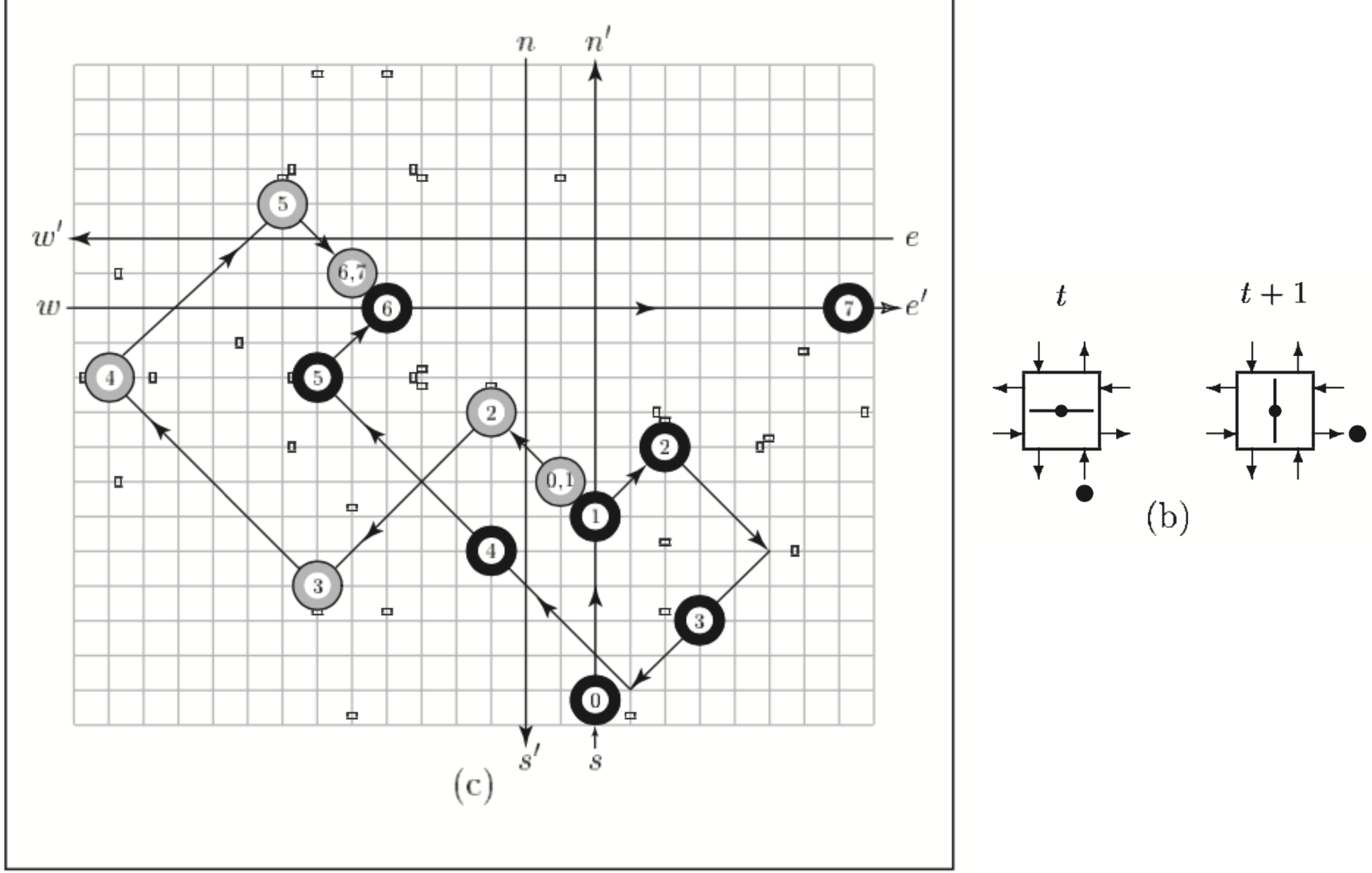


図 -7　ビリヤードボールモデルによるロータリー素子の直接的な実現法[4), 6)]．小さな長方形は反射板である．(a) は素子の状態 H と V を表すための静止ボールを置く位置を示す．(b) は状態が V で入力が s の場合の動作（図 -4 (a) に対応）を，(c) は状態が H で入力が s の場合の動作（図 -4 (b) に対応）を表す．

- 一般に複数のボールの遅延時間の調整は困難
- 森田の方法では,
  2つのボールのタイミングを考慮する必要があるのは，それらが衝突してから再衝突するまでの間だけ

ビリヤードボールで
可逆計算機ができるか？

- 機械的な仕組みで実現するのは不可能
  - ボールや反射板に無限の精度を要求
  - 摩擦のない環境が必要
- 何らかの物理的状態(例．量子的状態）での実現法の可能性

可逆論理回路を構成する

- 可逆論理回路では線の分岐/併合が不可能
- 通常：論理回路＝組合せ論理回路＋純粋な記憶素子
  - 現在の電子回路技術の標準
- 記憶つき可逆論理素子
  - 新しい考え方の可能性を提示
  - RSMやRTMの構成法⇒考案が容易，簡潔な構成
  - 可逆的な物理現象で直接実現する方法の可能性

例

現在の状態	入力	
	a_1	a_2
q_1	q_2b_1	q_3b_2
q_2	q_2b_2	q_1b_1
q_3	q_1b_2	q_3b_1

表 -2　可逆順序機械 M_1 の動作を定める表

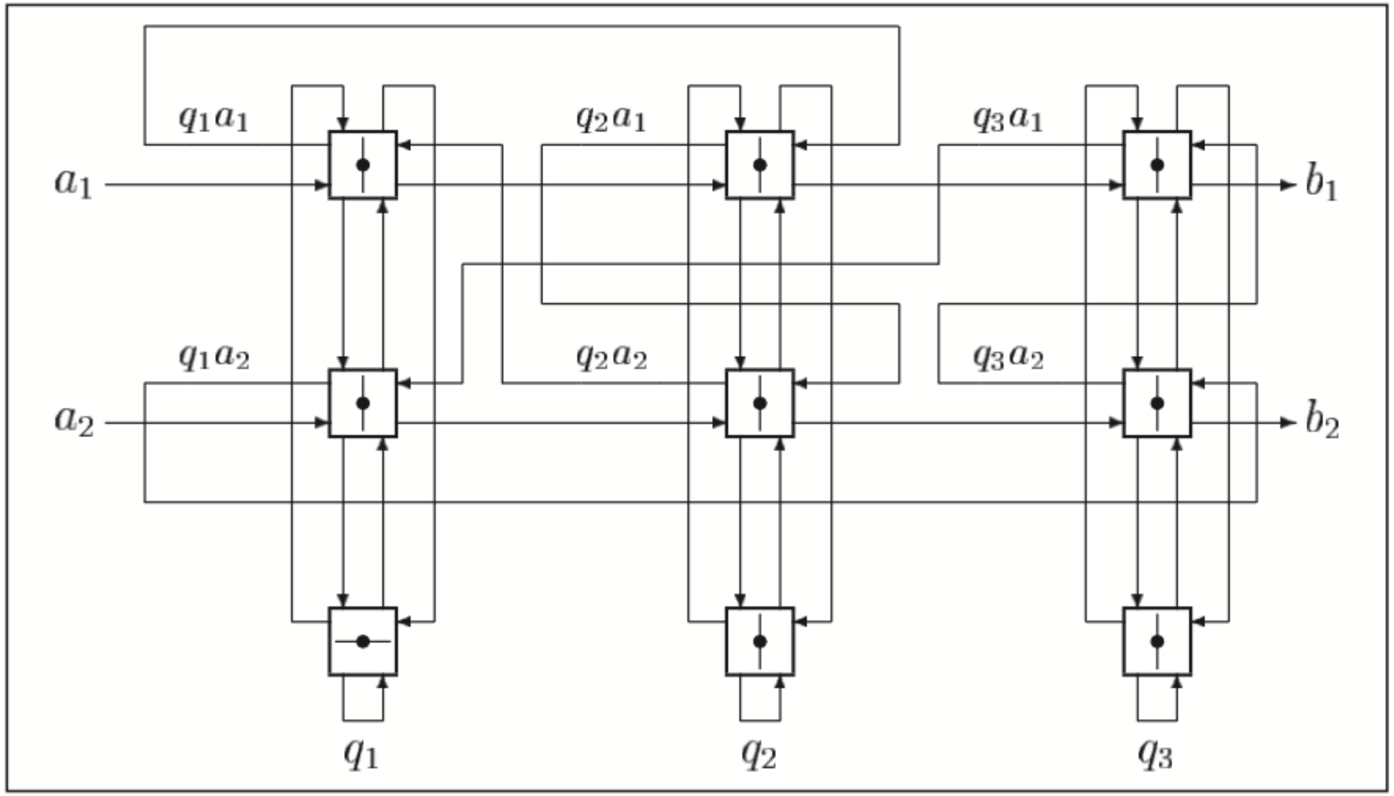


図 -8　可逆順序機械 M_1 を実現するロータリー素子による回路．この図では M_1 の状態は q_1 である．

可逆論理素子でRTMを作る

- チューリング機械(TM)
  - 最も古典的な計算機の理論モデル
  - ます目に区切られた無限調のテープ
  - ます目上の記号を読み書きするためのヘッドを持つ有限制御部
- 可逆チューリング機械(RTM)
  - それのどの計算状況（機械全体の状態）も直前の時刻の計算状況を高々1つしか持たない
  - 時間の逆方向に決定的なチューリング機械
- RTMの性質
  - 任意のTMをRTMでシミュレートできる
    ⇔ 可逆性の制約を課しても計算能力が「下がらない」
    （厳密には単射な計算可能関数のみが計算できる）

例．RTM T_{parity}

- 記号1がn個並んだ列(非負整数nの単進表現)の偶奇を返す
  - 偶数→受理状態q_{acc}，奇数→拒否状態q_{rej}
- 記号列を左から右方向に読んでいき，
  記号1を0に，0を1に書き換える

- 動作を定める5項組
  $\{[q_0, 0, 1, R, q_1], [q_1, 0, 1, L, q_{\mathrm{acc}}], [q_1, 1, 0, R, q_2], [q_2, 0, 1, L, q_{\mathrm{rej}}], [q_2, 1, 0, R, q_1]\}$

- RTM T_{parity} はロータリー素子で実現可能

例. 記号列"11"が与えたとき

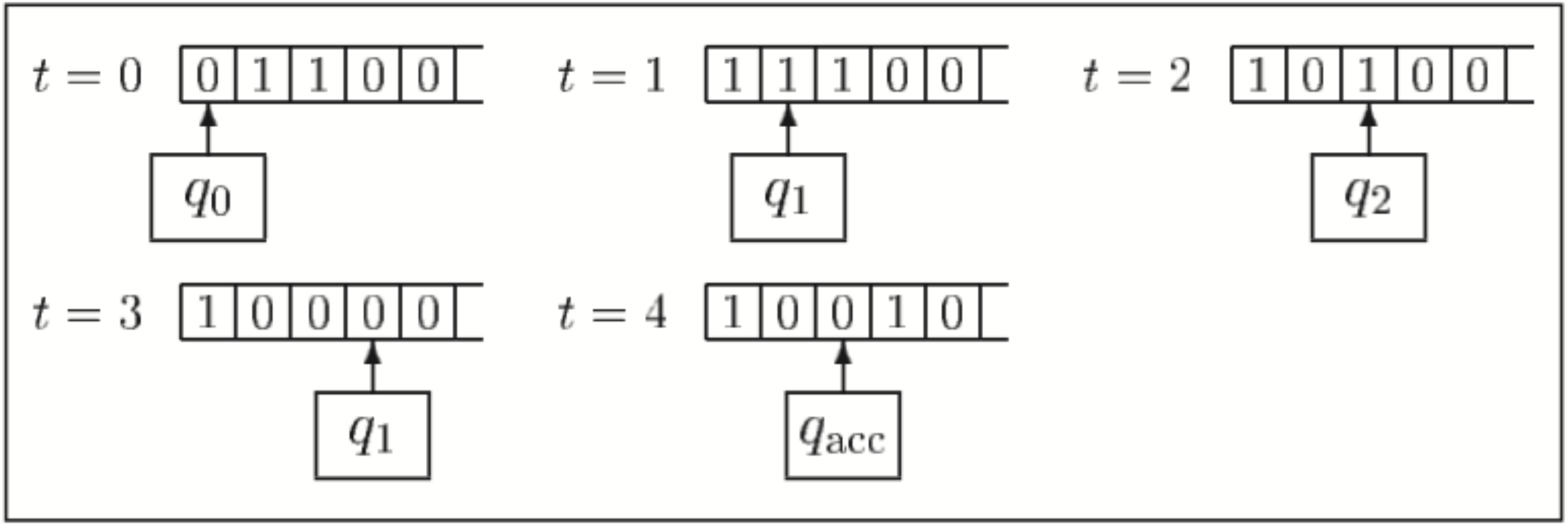


図 -9　可逆チューリング機械 T_{parity} に入力記号列 "11" を与えたときの計算過程

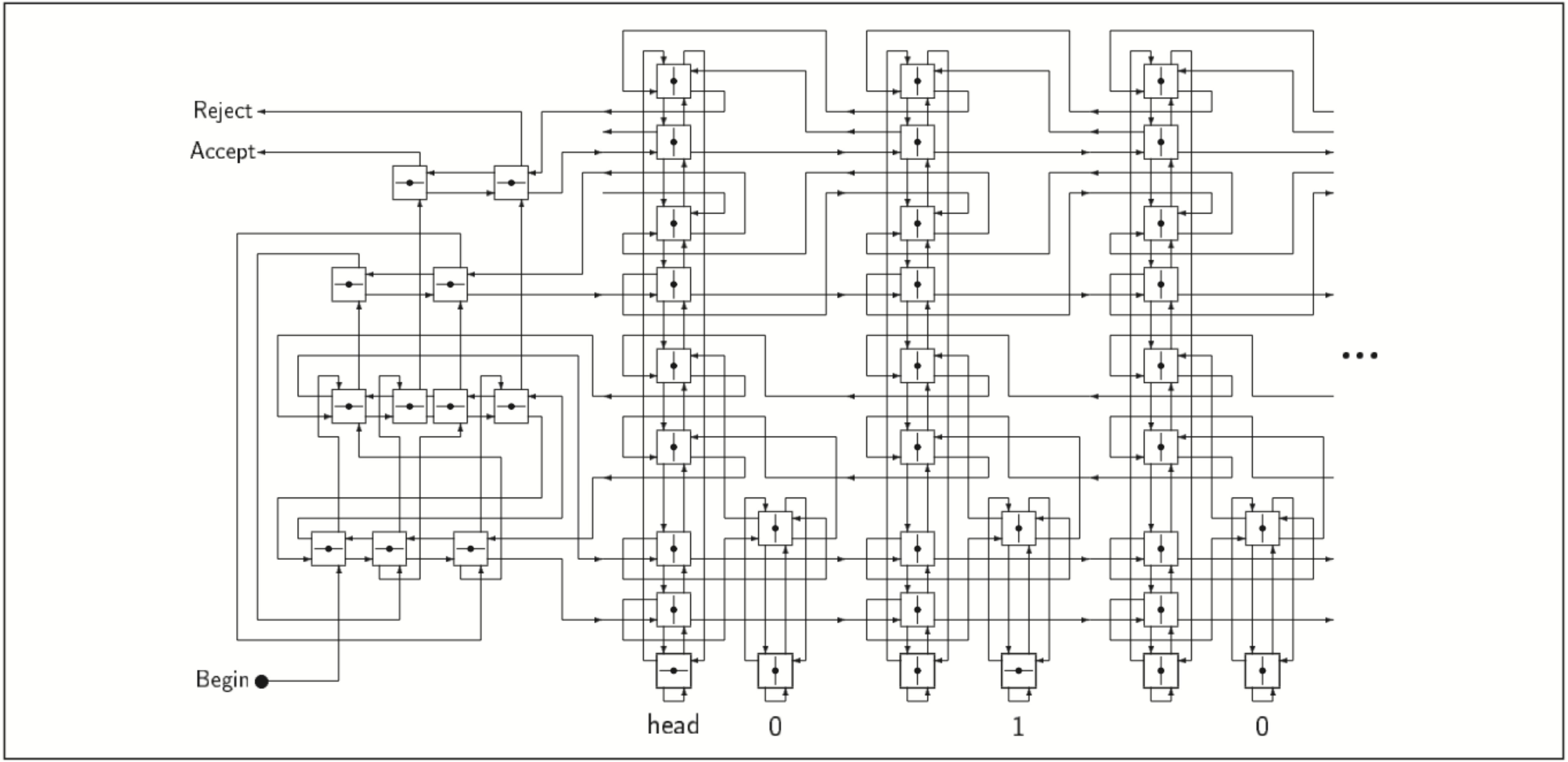


図 -10　ロータリー素子により構成された可逆チューリング機械 T_{parity}[5)]．この場合の入力記号列は “1” である．

可逆計算の展望

- 可逆計算の研究は1960年頃から；未だに発展途上
- 研究分野が近い量子計算は1990年代後半から脚光を浴びた
- 特に理論面では地道な研究が続く
- 2009年から国際集会が毎年開催
  - https://reversible-computation-2020.github.io/
- 2021年7月に名古屋で開催予定（横山が議長）

現在のコンピュータと可逆コンピュータ

- 現在のコンピュータ
  - AND, OR, NOTといった演算を基礎
  - 古代ギリシャのストア派やメガラ派の時代から知られている概念
  - 人の思考過程の分析から出てきたもの
  - 人にとって考えやすいもの
  - 短所：自然界の法則を直接的には反映していない
- 可逆コンピュータ
  - 物理的可逆性という自然界の法則を反映した演算・走査に基礎
  - 新しいアイディアを考え出すことが必要
  - 将来の計算システムを 考えるための新たな視野を開き,
    知的好奇心を呼び起こしてくれる領域

参考文献
（本テーマを選択した人は各自で要調査）

1)Bennett, C. H. : Logical Reversibility of Computation, IBM J. Res. Dev., Vol.17, pp.525-532 (1973).

- IBMの研究者の執筆した可逆計算の基本文献の1つ
- 知っておくべきこと
  - 可逆チューリング機械
  - Bennettの可逆シミュレーション法(非単射と単射の場合の両方)

2) Fredkin, E. and Toffoli, T. : Conservative Logic, Int. J. Theoret. Phys., Vol.21, pp.219-253 (1982).

- 可逆回路の基本文献の1つ
- 知っておくべきこと
  - 著者らの名前から命名されたFredkinゲートとToffoliゲート
  - 任意の非可逆回路の埋込み方法

3)Landauer, R. : Irreversibility and Heat Generation in the Computing Process, IBM J. Res. Dev., Vol.5, pp.183-191 (1961).

ランダウアの原理についても言及されている

4)Morita, K. : Reversible Computing and Cellular Automata — A Survey, Theoret. Comput. Sci., Vol.395, No.1, pp.101-131 (2008).

可逆計算と可逆セルオートマトンの調査論文

5)Morita, K. : Constructing a Reversible Turing Machine by a Rotary Element, a Reversible Logic Element with Memory, Hiroshima University Institutional Repository, http://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/00029224 (2010).

ロータリー素子で可逆チューリング機械を構成する方法

6) 森田憲一: 可逆計算(ナチュラルコンピューティング・シリ ーズ第5 巻)，近代科学社，東京 (2012).

日本語で読むことができる可逆計算のテキスト