「可逆コンピューティング　森田憲一」　文献調査レポート

グループ４　2018SE098 若浜 大揮, 2018SE107 吉見 颯, 2016SE058 村瀬 直生

１．研究分野

可逆計算の基礎

２．目的

可逆性は、可逆的な計算機システムを構築する上で重要な役割を果たす。この論文では、可逆的な計算システムが可逆的な論理素子、可逆的な物理システムによってどのように構成出来るのかを考え、可逆コンピューティングの新しい設計のアイディアを得る。

３．背景

論理的な可逆性は、計算機システムにおいて重要になる。

なぜなら、現在の電子素子は、1 つの巨大状態に膨大な微視的状態が対応しているが、近年、計算機素子の急速な微細化により、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なる。そして、微細化が進むと、論理的な可逆性がエネルギー消費を大幅に減らすために必要になってくるからである。

また、微視的世界は可逆的なため、自然の法則が計算機に求める制約はなにか、そして、可逆性をどう利用すれば、計算機を微細化する事が出来るのかを考える必要がある。

４．アプローチ

可逆的な計算システムが可逆的な論理素子、可逆的な物理システムによって、どのように実現されるのかを考えるために、理論的計算モデルを用いた。

可逆的な物理システムで、可逆計算システムを実現する事は可能なのか考えるために、Fredkin と Toffoli によって提案されたビリヤードボールモデル（図 6）を使用した。

可逆論理素子を用いて可逆コンピュータを実現させるために、記憶つき可逆論理素子のロータリー素子（図 3、図 4）を使用して、回路を構成した。

可逆論理素子で可逆チューリング機械の作成方法を考えるために、可逆チューリング機械の例T_{parity}をロータリー素子からなる回路で実現させる。

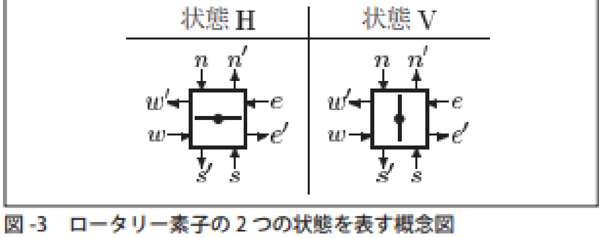

図 -3　ロータリー素子の 2 つの状態を表す概念図

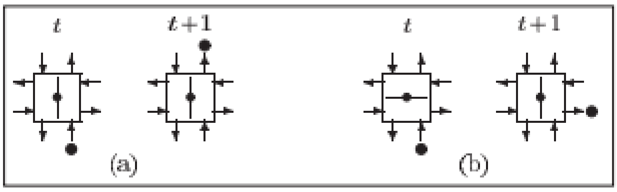

図 -4　ロータリー素子の動作．(a) 粒子が棒と平行に入力された場合と，(b) 棒と垂直の場合．図中の粒子●は時刻 t においては入力，t+1 においては出力と解釈される．

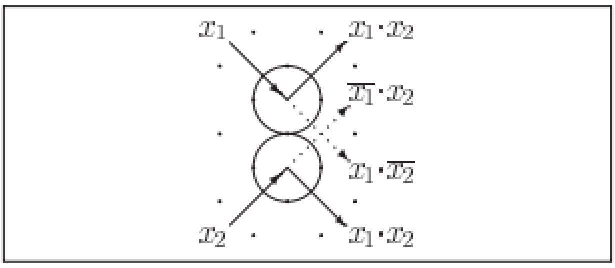

図 -6　可逆的な物理モデルであるビリヤードボールモデルによる相互作用ゲートの実現[2)]

5.結果

フレドキンゲートを使用せずロータリー素子を BBM 中に実現する方法が図-7 となる。

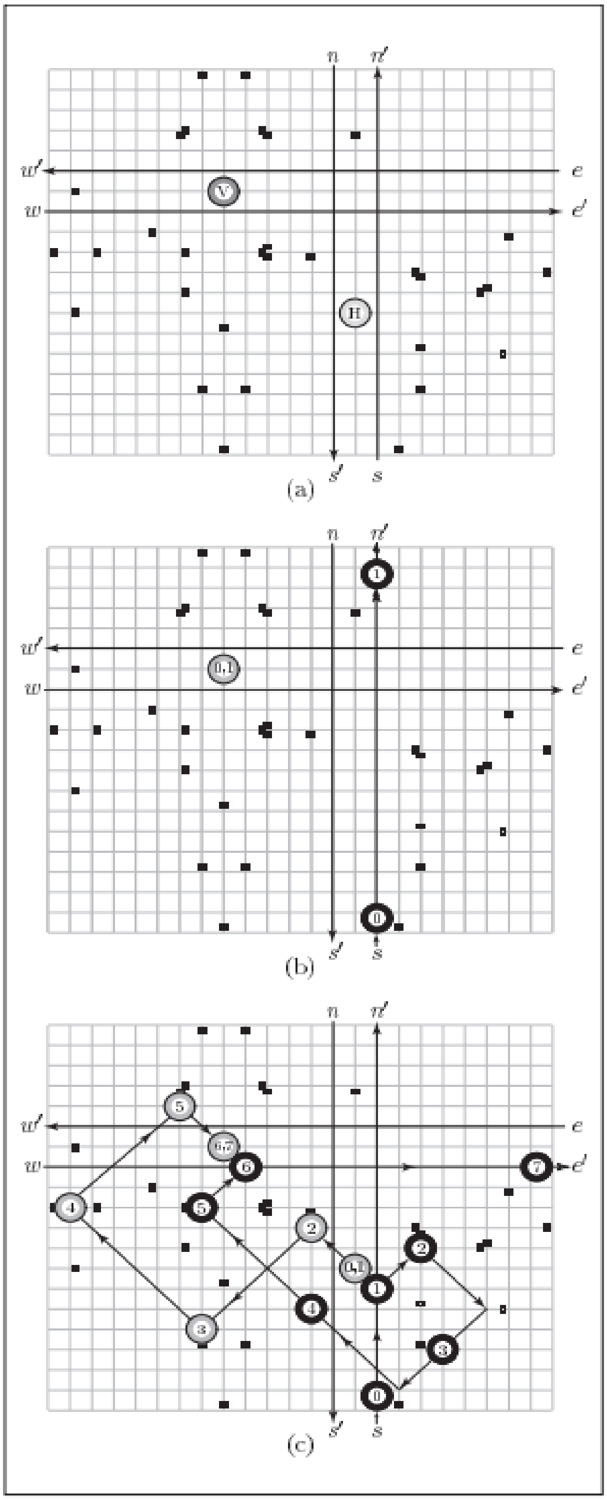

図 -7　ビリヤードボールモデルによるロータリー素子の直接的な実現法[4), 6)]．小さな長方形は反射板である．(a) は素子の状態 H と V を表すための静止ボールを置く位置を示す．(b) は状態が V で入力が s の場合の動作（図 -4 (a) に対応）を，(c) は状態が H で入力が s の場合の動作（図 -4 (b) に対応）を表す．

可逆チューリング機械をロータリー素子からなる論理回路によって実現したものが図-10となる。

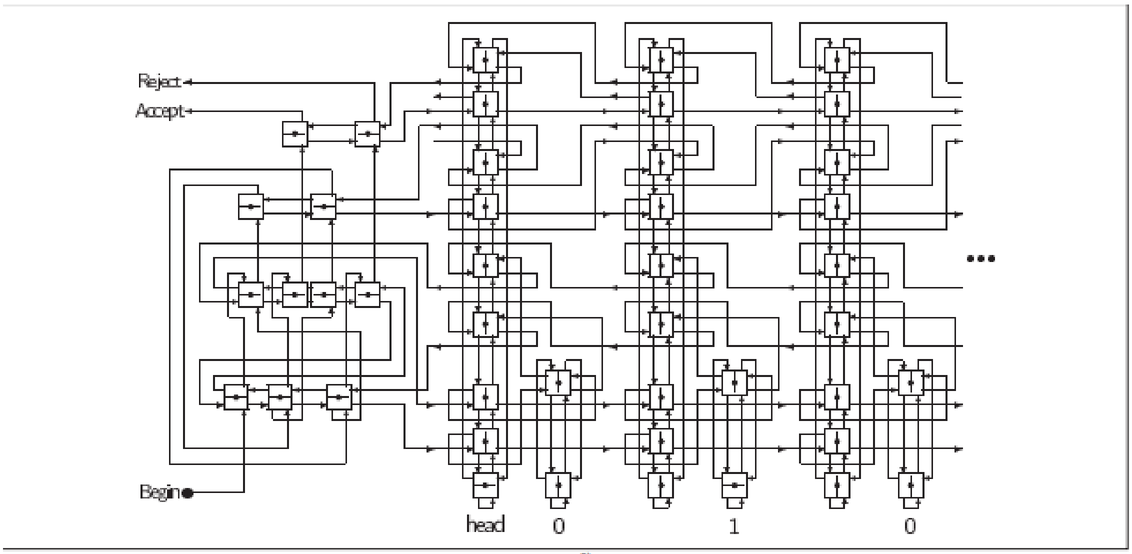

図-10　ロータリー素子により構成された可逆チューリング機械 T_{parity}[5]．この場合の入力記号列は "1" である．

各素子に静止したボールを 1 つ、適切な位置を置くことによって BBM 中に図-10 を実現できる。
BBM においてボールとボール、ボールと反射板の衝突が弾性的で摩擦の無い状態であれば計算過程でエネルギーの消費、散逸が無くなり可逆コンピュータが実現できる。

6. 有用性

　記憶つき可逆論理素子の研究は、これまでの記憶素子と論理ゲートの組み合わせからなる論理回路を切り離して考えられてきた研究では発見されなった考え方が見つかる可能性がある。また可逆順序機械や可逆チューリング機械の実現方法が考えやすくなる。ビリヤードボールでコンピュータを作るには非現実的ではあるものの、可逆的な物理現象で実現する方法が存在する可能性が BBM により示唆されている。

7. 限界・短所

　ビリヤードボールでコンピュータを作ることが非現実的であることが示されたが決定的に可逆的な物理現象で実現することが可能であると示されていない。

8. 次に何を読むと良いか

森田　憲一: 逆計算：計算の理論における逆問題：2. 計算における可逆性　-可逆チューリング機械と可逆論理回路-
情報処理,Vol.35,No.4(2012)　オープンアクセス