

ADC2018問題の自動生成手法に関する一検討

和田 邦彦^{†1} 大和田 真由^{†1} 赤木 佳乃^{†2} 佐藤 真平^{†2} 高橋 篤司^{†2}

概要：本稿では、多層ナンバーリンク問題インスタンスの乱数を用いた自動生成手法について検討するとともに、生成された問題インスタンスの評価手法について検討する。また、本稿で検討した問題生成手法を用いて作成し ADC2018 に使用した問題インスタンスの評価をすることで、本稿で検討した問題インスタンス生成手法の有用性を確認した。

1. はじめに

VLSIの大規模化および微細化により、配線の自動化への要求はますます強くなっている。それに伴い、配線アルゴリズムの改良が日々行われているが、アルゴリズムの性能評価にはベンチマークが不可欠である。新アルゴリズムのベンチマークの回答結果を解析することにより、新アルゴリズムの優位性が確認できるだけでなく、改良の端緒にもなり得る。

ベンチマークによるアルゴリズムの性能評価によって得られる知見を最大にするには、使用する問題インスタンスがベンチマークとして妥当なものになるように問題インスタンスの設定をコントロールする必要がある。問題インスタンスの設定を詳細にコントロールするのであれば、人手による問題作成が最適だろう。しかし、人手では作成できる問題インスタンスのサイズに限りがある。また、人手による作成では、大量の問題インスタンスを一般性を保ちながら作成することは困難である。

本研究は、多層ナンバーリンク問題を題材とし、効率的な問題インスタンスの自動生成手法および生成された問題インスタンスの解析しベンチマークとしての妥当性を評価する方法を確立することを目的とする。また、ソルバの性能評価結果とベンチマーク作成の目的に基づいた、妥当な問題コンフィギュレーションの決定方法の確立も目的とする。

本稿では、アルゴリズムデザインコンテスト 2018（以下、ADC2018）のレギュレーションに基づいた多層ナンバーリンク問題インスタンスの乱数を用いた自動生成手法について検討するとともに、自動生成された問題インスタンスに対する評価方法を検討する。また、本稿で示す問題インスタンス生成手法を用いて生成し、ADC2018 でコン

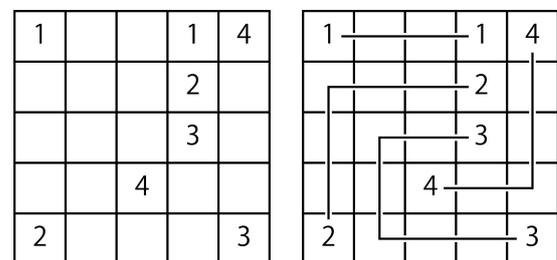


図 1 ナンバーリンク問題例とその解答

テスト問題として出題された問題に対して評価を行い、本稿で検討した評価手法の有用性を確認する。

2. 準備

本節では、次節以降の議論の準備として、一般的なナンバーリンクおよび ADC2018 で題材となった多層ナンバーリンクについて説明する。また、ADC2018 の概要についても説明する。

2.1 ナンバーリンク

ナンバーリンクは株式会社ニコリによるペンシルパズルである。マス目上の数字のペアを全て繋げることを目的としており、2 端子ネット配線問題との親和性が非常に高い。ニコリによるナンバーリンクのルール説明 [1] は以下の通りである。

- 白マスに線を引いて、同じ線どうしをつなげましょう。
- 線は、マスの中央を通るようにタテヨコに引きます。線を交差させたり、枝分かれさせたりしてはいけません。
- 数字の入っているマスを通るように線を引いてはいけません。
- 1 マスに 2 本以上の線を引いてはいけません。

図 2.1 にナンバーリンクの問題例とその解答を示す。

^{†1} 現在、東京工業大学工学部情報工学科

^{†2} 現在、東京工業大学工学院情報通信系

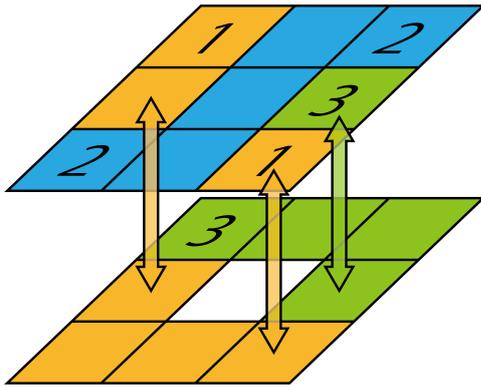


図 2 多層ナンバーリンクの例

2.2 多層ナンバーリンク

ADC2018 で題材となった多層ナンバーリンクは、一般的なナンバーリンクを多層化し、3D 配線を模した形に拡張した問題である。

図 2 に 2 層の多層ナンバーリンクの配線済みの問題例を示す。図 2 のように、隣接するマスを接続することができる。

以降、多層ナンバーリンクにおいて、マス目の集合である平面および多層化されたそれらの集合を盤面と呼び、盤面上で数字のペアとして表現されている接続要求およびそれらが接続されたものをネットと呼ぶこととする。

2.3 表記の定義

以降での説明のために、多層ナンバーリンクに関する表記を定義する。

またネットについて、ネットの 2 端子の盤面上の位置が (s_x, s_y, s_z) と (t_x, t_y, t_z) のとき、そのネットを $n((s_x, s_y, s_z), (t_x, t_y, t_z))$ と表記する。

また、一平面のマス目数と層数を積を問題サイズと呼ぶこととする。問題サイズは盤面を図のように考えたときの盤面上の総マス目数と考えることもできる。

2.4 アルゴリズムデザインコンテスト 2018

DA シンポジウムの併設企画として開催されたアルゴリズムコンテスト 2018 (ADC2018) [2] は多層ナンバーリンクソルバの競技会である。我々は集合対間配線による [3] 初期解生成と引き剥がし再配線による解の改善を利用した「とりあえずつないではんせいするほうほう (以下, T2H2)」[4] を用いたソルバで参加し、全問正解で優勝した。

ADC2018 における多層ナンバーリンク問題のレギュレーションは以下のとおりである。

- 最大問題サイズは 72×72 の平面を最大 8 層
- ネット数に上限なし
- 解の品質は以下の式で評価される
(解の品質) = $1 / ((\text{総配線長}) + (\text{折れ曲がり回数}) + \alpha(\text{隣接境界線数}))$

$$\alpha = 1/3$$

3. 問題生成器

本節では、性能評価に使用する問題インスタンスの生成器について説明する。

3.1 生成する問題

生成器について述べる前に、生成器が生成する問題インスタンスの性質について説明する。本稿で説明する問題生成器は、全ての端子が 2 端子ネットである問題インスタンスを生成する。盤面はすべての平面が同サイズとする。ネットの端子は盤面上のランダムな位置に生成される。また、本稿における問題インスタンス生成器は配線可能性が保証された問題インスタンスのみを生成する。

3.2 問題生成手法

本稿で説明する多層ナンバーリンク問題インスタンス生成器は乱数を用いてネットの端子を配置する。生成器は以下の仕様を満たす。

入力 盤面のサイズ, ネット数

出力 3.1 で示した制約を満たす多層ナンバーリンク問題インスタンス

以下に示す問題生成手法では、いずれも最初に、入力で受け取ったサイズの盤面を作成する。作成した盤面上に配線可能なネットをランダムに生成し、ネットには作成した順にネット番号を割り振るものとする。

3.2.1 問題インスタンス生成手法 1

先に全ネットの 2 端子を全て生成し、後から配線可能性を検査するという方法が考えられる。もっとも単純な方法だと、以下のようなアルゴリズムによって出力が得られる。

- (1) 盤面上に、全ネットの両端子をランダムに生成
- (2) 自前のソルバで全ネットを配線
- (3) 全ネットの配線に成功した場合、(1) で生成したネットリストを出力。失敗なら (1) に戻って全ネットを生成し直す。

(1) でネットの端子を生成した時点では、ネットの配線可能性は不明である。そこで、配線可能性を検査する必要があるが、ネットの位置情報のみを元に配線可能性を高速に検査する方法は存在しない。そのため、配線可能性を検査するために (2) でソルバに問題を解かせる。

この方法では、作成できる最大の問題サイズがソルバの性能に依存することになる。また、生成した全ネットの配線が不可能だった場合でもソルバは求解を試み、求解は何かの条件でソルバがアボートするまで続く。そのため、問題サイズやネット数を大きくすると問題の生成にかかる時間が大きく増えていき、妥当な時間内に問題インスタンスを得られなくなる。

3.2.2 問題インスタンス生成手法 2

効率的に問題を生成するために、配線可能性を保持しながらネットを生成する方法を示す。以下のようなアルゴリズムでそれを実現する。

- (1) ソースをランダムに選ぶ。
- (2) ソースから到達可能なマスを探査し、ソースから未使用マスのみで到達可能なマスからシンクをランダムに選ぶ。
- (3) ソースとシンクを配線し、配線に使用したマスは使用済みのマスとする。
- (4) (1) から (3) をネット数分繰り返す、ネットリストを出力。

このアルゴリズムでは、便宜上ネットの2端子のうち一方をソースとし、もう一方をシンクとする。アルゴリズムの初期状態では、盤面の全てのマスが未使用状態であるとする。

(1) ではソースを未使用のマスからランダムに選ぶ。(2) では(1) で選んだソースを始点として幅優先探索を行い、ソースから到達可能なマスを探査する。このとき、到達できるマスはソースから未使用のマスのみで到達できるマスとする。また、ソースから到達可能なマスが1つもない場合、(1) に戻りソースを再び選択する。到達可能なマスの中からシンクをランダムに選択し、選択されたソースとシンクを接続要求としてネットリストに追加する。(3) では(1) で選択したソースと(2) で選択したシンクを配線する。このとき配線に使われたマスは、ソースとシンクも含めて、使用済みのマスとする。この操作により、ソースとシンクの配線に使用されたマスは(1) および(2) のステップで選択されなくなり、一つのネットに対し少なくとも一つの配線路が確定する。よって配線可能性を保証しながらネットの生成ができる。これらの操作を繰り返すことで、全てのネットが配線可能であることが保証された問題インスタンスを得られる。

図3に盤面サイズが $5 \times 5 \times 1$ でネット数が2の場合の問題生成例を示す。白マスが未使用のマス、黒マスを使用済みのマスとする。S, T と表記されたマスは、それぞれ該当サイクルで選択されたソース、シンクとする。また、(b), (e) において灰色のマスはそれぞれのサイクルのソースから到達可能なマスを表し、太線で囲まれた経路で配線が行われるものとする。

3.2.3 拡張

3.2.1 および 3.2.2 で示した問題インスタンス生成手法はいずれも盤面上の全てのマスにランダムにネットの端子を生成するものだった。しかし、ベンチマーク作成の目的によっては、生成されるネットに何らかの制限を課したいことがある。例えば、一部もしくは全てのネットが一定の配線長で配線可能であることを期待する場合や、ネットの2端子をそれぞれ盤面上のある領域にのみ出現させる場合な

どが考えられる。

このような、ネットの配置に関する拡張であれば、3.2.2 で示したアルゴリズムの(1) や(2) においてソースやシンクの選び方に変更を加えれば良い。例えば、配線長に制限を加えるのであれば(2) でシンクを選ぶ際に配線長を考慮すれば良く、端子の出現位置に制限を加えるのであれば(1) および(2) におけるソースおよびシンクの選択に制限を加えれば良い。

4. 問題難易度の評価

本節では、3.2.2 で示した問題生成手法によって得られる問題インスタンスの回答難易度の評価法について検討する。本稿では、問題インスタンスの回答難易度は T2H2 ソルバによる回答時間で確認する。

4.1 Half Perimeter Wire Length

問題難易度評価法の説明に先立ち、本稿におけるネットの Half Perimeter Wire Length (以下、HPWL) を定義する。HPWL はネットの接続に使用されるマスの数の下界を表し、ネット $n((s_x, s_y, s_z), (t_x, t_y, t_z))$ の HPWL を以下の式で与えられる。

$$HPWL = |s_x - t_x| + |s_y - t_y| + |s_z - t_z| + 1 \quad (1)$$

4.2 準備

以降の議論の準備として問題インスタンスに対する評価尺度を定義する。

問題インスタンスの混雑度を配線密度 d を以下に定義する。

$$d = \frac{\sum_{\text{全ネット}} (\text{ネットの HPWL})}{(\text{問題サイズ})} \quad (2)$$

配線密度はその定義から、1 を超えると配線不可能なネットが存在する。

また、全てのマスに同確率でネットの端子が出現すると仮定すると、問題サイズが $x \times y \times z$ のとき HPWL の期待値 $E(HPWL)$ は $x + y + z$ の3分の1となり、次の式が成り立つ。

$$E(d) = \frac{(\text{ネット数})(E(HPWL))}{(\text{問題サイズ})} \quad (3)$$

以降、式3によって得られる配線密度を期待配線密度と呼ぶ。また、問題インスタンスをソルバで解いた後に得られる、問題サイズに対する総配線長の割合を実配線密度と呼ぶ。

4.3 ADC2018 提出問題の評価

ADC2018 では本稿で示した問題インスタンス生成手法を用いて生成した問題インスタンス2問を提出した。提出した問題は ADC2018 における問題 Q6 と Q11 である。い

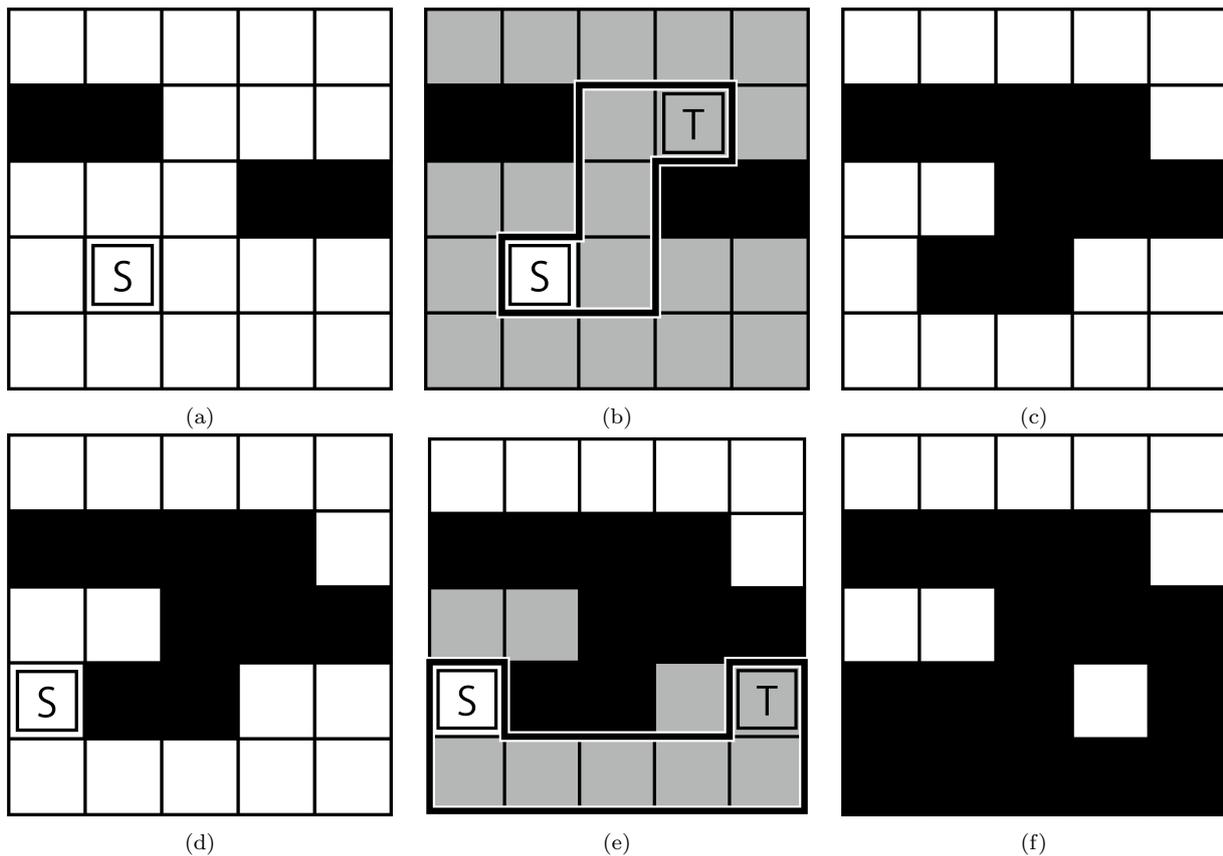


図 3 配線路が確定していく様子

表 1 ADC2018 提出問題

	Q6	Q11
期待配線密度	0.473	0.473
配線密度	0.469	0.484
実配線密度	0.528	0.571
配線時間 (s)	153.246	164.644

ずれも問題サイズは $72 \times 72 \times 8$ 、ネット数は 375 として生成した。

表 1 に期待配線密度、配線密度、T2H2 によって得られた配線パターンの実配線密度、また T2H2 ソルバによる配線時間を表まとめた。

5. まとめ

今後、期待配線密度を変化させながら生成した問題インスタンスに対する T2H2 ソルバの回答結果を分析し、問題コンフィギュレーションに応じた T2H2 ソルバの求解能力の変化を解析する必要がある。本項では、多層ナンバーリンクにおいて、配線可能性が保証された問題インスタンス生成方法を示した。今後の課題として、ネットの端子の位置関係や重なり度に基づく配線密度を用いた問題インスタンスの評価法の開発などが挙げられる。

参考文献

- [1] Web ニコリ:ナンバーリンク, 株式会社ニコリ(オンライン), 入手先 (<https://www.nikoli.co.jp/ja/puzzles/numberlink/>) (参照 2018-11-05).
- [2] 2018DA シンポジウム実行委員会: DA シンポジウムアルゴリズムデザインコンテスト, 情報処理学会(オンライン), 入手先 (<https://dasadc.github.io/adc2018/>) (参照 2018-11-05).
- [3] 高橋篤司: 集合対間配線問題に関する一考察, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 111, pp. 23-28 (2011).
- [4] 大和田真由, 和田邦彦, 赤木佳乃, 佐藤真平, 高橋篤司: 集合対間配線問題ソルバと引きはがし再配線の ADC2018 問題への適用, 情報処理学会研究報告 (SLDM) (2017).