

無向グラフを応用した空調ダクト計画の施工性評価・自動設計手法

○藪田 渉（新菱冷熱工業） 深田 賢（新菱冷熱工業） 山本 誠（新菱冷熱工業）

BIMを背景とした建築生産のDXにより、合意形成の円滑化をはじめとしたプロセス全体にわたる効率化が期待される一方で、設計者としてはより早い段階から施工までを考慮した高度な検討が必要となる。そこで本稿では、計画段階のBIMに施工性を反映し、設計-施工間でのデータ移行を円滑化することを目的に、空調ダクト計画をスペース納まりと施工費用から評価・最適化する手法を提案した。同手法の特徴は、ダクト計画を室などのスペースの隣接関係を表現した無向グラフ上で解析することにある。これによって、最適解探索手法である遺伝的アルゴリズム(GA)の適用が可能になり、従来の設計者による検討よりも自由な発想で、納まりと施工費用を最適化した計画を生成することができる。本稿後半では、GAによる最適解の探索について、ハイパーパラメータの設定や、計算資源の配分方法について検討・実験を行い、その結果を報告している。これらの活用によって、初期のBIMモデルに施工性や費用を反映することが可能となり、空調設計者の検討業務の省力化だけでなく、意思決定のフロントローディングにも資することが期待される。

1. はじめに

BIM (Building Information Modeling)を背景とした建築生産のDXは、三次元で即時かつ容易な情報伝達を可能にし、生産プロセスにおける合意形成の効率化をもたらす。空調設備の施工者としても、業種間での取合い調整の円滑化や、施工シミュレーションによる施工の合理化など、享受するメリットは大きい。

その効用を最大化するには、企画段階からBIMを活用し、三次元で検討を行うことが有効である。しかし、設計初期は未確定事項が多く、検討目的で多様なBIMを作成することは、設備設計者の作業負担を増大させる。

そこで、検討段階におけるBIM作成支援のため、空調設備設計の初期に行われる空調ダクトの主要経路を自動で設計・最適化する手法を考案した。フロアプラン・設備仕様を基に、知識ベースおよび遺伝的アルゴリズム(GA)によって施工性・施工費用を考慮したダクト経路の設計を自動で生成する。

ここで、知識ベースとは、設計者が行う思考をルール化したものを指す。一方GAは、離散値をとる解空間に対して、生物進化を模した集団を用いて最適化を行う手法で、プラント設計などで既に実績がある²⁾。本稿では、2種類の経路探索を組み合わせた自動設計手法の概要と、実用化に向けた展望について報告する。

2. 自動設計手法の概要

自動設計および最適化の要目について、表1に示す。

Table-1 Outline of the present method

対象	事務所建築におけるメイン空調ダクトの計画
評価変数	施工スペースの確保 施工費用の最小化
入力	各室の配置 (位置・サイズ) 各室に配置するダクト系統、所要送風量、 受け持つ機械室・ダクトシャフト
出力	BIMモデル作成のための分岐点位置、 ダクトサイズ

一般的な事務所建築における天井内ダクトのうち、各室と空調機や堅ダクトとを結ぶメインダクトの計画を最適化の対象とする。評価変数は、施工時に必要となる建築・設備間の離隔距離を反映したスペースの納まり、および材料費、労務費を含めた施工費用である。これにより、施工に必要なスペースを確保しつつ、施工費用を最小化したダクト計画の生成を図る。

入力条件は、フロアプランの決定と概略負荷計算が完了した段階を想定し、室の配置 (座標・サイズ)、各室に送風すべき風量、およびその受け持つ機械室・シャフトの位置 (ゾーニング) を所与とした。ここから各室と機械室等を結ぶダクト経路・サイズの設計を自動で行い、BIMモデルの作成に必要な分岐点の位置、ダクトサイズを出力する。

以下、最適化の手法について詳述する。

3. 自動設計プロセス

図1に、本手法による自動設計のフローを示す。入力

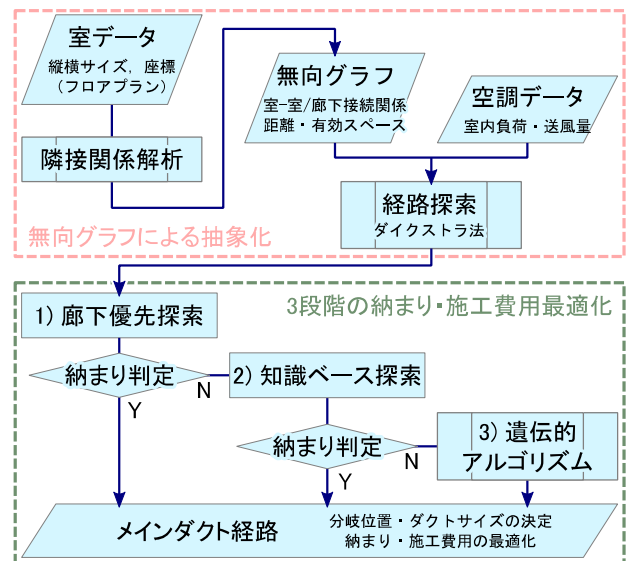


Figure-1 Flow diagram of the present method

条件の室・建築および空調データを無向グラフに整理し、段階的な最適化を行うことが、本手法の特徴である。

3.1. 無向グラフによる抽象化

配管設備の自動設計では、対象となる空間をメッシュ分割し、そこでダイクストラ法により経路探索を行う手法が報告されている³⁾。このような手法は、施工段階で問題となる詳細な納まりを検討できる反面、計算負荷が増大しがちであり、局所的干渉が大局的な経路探索に影響することがある。この意味で、設計段階で多様な検討を行うには不向きといえる。

本手法では、メイン経路の分岐パターンの最適化という大域的な探索に主眼を置く。そこで、メッシュに代えて室・廊下の接続関係を表す無向グラフによる抽象化を行った(図2)。これにより、メッシュによる分割よりも小さな計算負荷で経路探索・分岐の検討が可能になる。また、各辺に室間の距離と、ダクトの物量、天井内スペースとを対応付けることで、スペースの納まりや施工費用をも評価することができる。

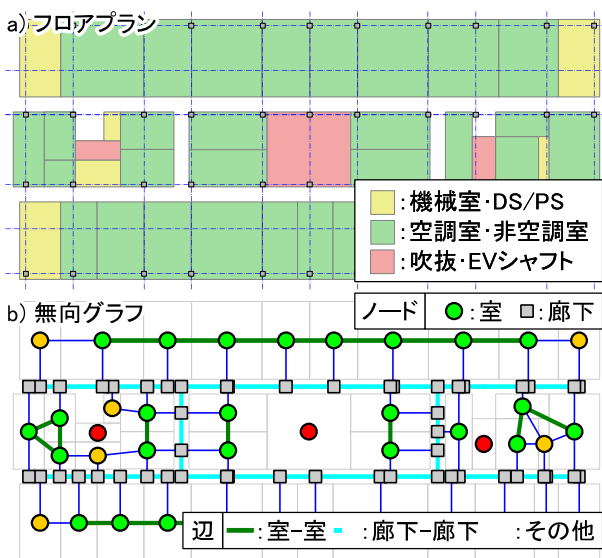


Figure-2 Representation of a floor-plan in an undirected graph

3.2. 探索手法

分岐パターンの探索に当たっては、設計者同様、まずメイン経路を配置し、次いで分岐を決定する方法は非効率といえる。まず合理的なメイン経路の範囲を定義し、パターンを生成しつつ、試行ごとに新たに定義しなおす必要があるためである。

本手法では、各室から機械室への経路を多様なルール(廊下・室間優先等)で探索し、その共通部分をメイン経路とする。すなわち、経路分岐位置・パターンの問題を、経路探索ルールの組み合わせ問題に帰着して探索を行う。これにより、経路の合理性を確保しつつ、最短経路探索の前方集約による計算時間短縮を図る。

ところで、GAは大域的探索に適した手法であるが、空

調設備の設計において、要求される解には一定の制約がある。たとえば、メンテナンス性を考慮すると、メインダクトは廊下を通過するほうが望ましいといえる。

このような点を考慮し、本手法では初めからGAを用いて新奇な発想を求めるのではなく、以下のように段階的な探索を行う。設計者の思考を反映した知識ベースの探索をはじめに行うことで、設計として妥当な解が得られやすいように配慮した。対して、GAにおいては、このような制約を設けず、納まり・施工費用が改善しうるすべてのパターンを対象に探索を行う。

- 1) 廊下優先探索: すべての室・機械室・シャフトについて、廊下を通るように経路を探索する
- 2) 知識ベース探索: 納まり不良箇所がある場合、室間を優先して通る経路を探索する
 - a) 室を廊下等で隔てられたブロックに分割する
 - b) 機械室・シャフトに近いブロックから順に経路を再探索する
 - c) 再探索後に収まりを評価し、改善があればその経路を採用し、なければ従前の経路に戻す
 - d) 納まり不良箇所がなくなるか、すべてのブロックについて再探索するまでb,cを繰り返す
- 3) GA: なお納まらない箇所がある場合に、GAによる最適解探索を行う

3.3. 評価変数

ダクト計画に対する施工性の評価変数として、スペースの納まりと、ダクトの施工費用を用いた。

(1) スペース納まり

本手法では、梁下・天井内にダクトを配置することを前提に、スペースの納まりを評価する。天井内の空間を無向グラフの辺に対応する区間で分割し、その鉛直断面のうち、梁・柱、および天井との間にダクト施工に必要な離隔距離を控除したスペースを、当該区間の有効スペースとして定義する(図3-a)。

ダクトに関しては、前述の経路探索により、無向グラフの各区間を通過する風量が与えられる。この風量と、系統ごとに設定した選定基準から、等摩擦法によってダクトを選定する。こうして選定されたダクトの幅の合計が、区間の有効幅を下回ればダクトは納まり、上回れば納まらないと判定する(図3-b, c)。

(2) ダクト施工費用

施工費用の評価は、ダクトサイズおよび材料の物量を基準とした。無向グラフ上で選定されたダクトサイズと、辺の長さとの乗算し、ダクト面積を求める。これにサイズ・板厚に応じた所定の掛け率を乗じ、その合計で施工費用を評価する。さらに、メインダクトが廊下を優先して通過するよう、室・室間間を通るダクトの施工費用を高く見積もることとした。

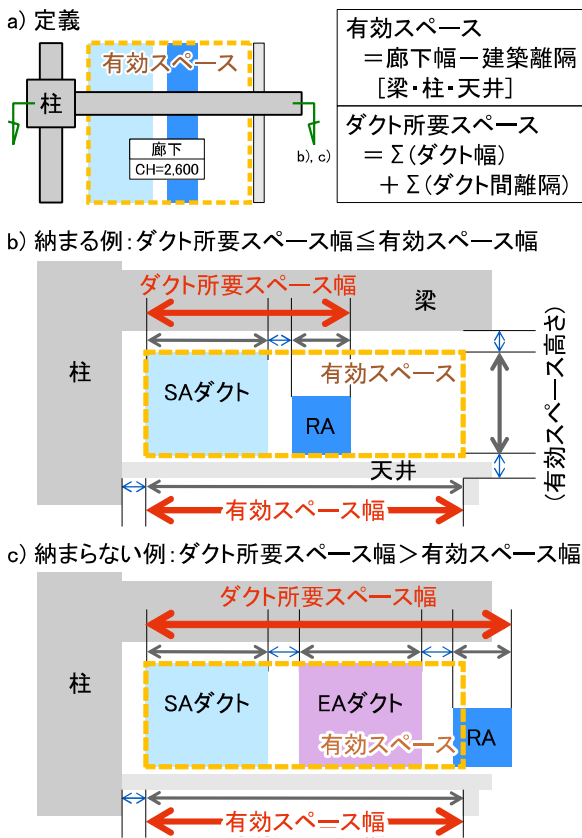


Figure-3 Definition and examples of space evaluation

4. 適用実験

4.1. 仮想的事務所のメインダクト設計

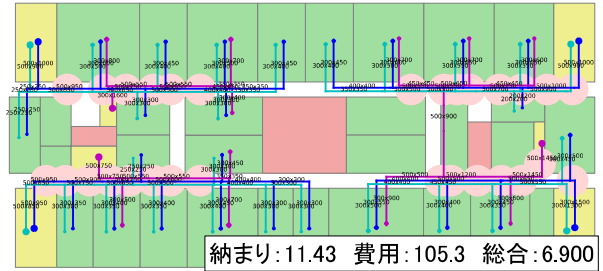
仮想的な事務所建築の基準階を想定し、メインダクト経路を自動設計する実験を行った。約 3,500 m²の基準階に、各 4 系統の空調ダクト（給気・還気）および 3 系統の排煙ダクトを配置する。

本手法の各段階で得られた設計を、図 4 に順を追って示す。図中では、各段階のモデルについて、納まり・施工費用の評価値および両者を総合した評価値を示す。納まり、施工費用の両評価値は、それぞれ高いほど、納まり不良箇所が多く、施工費用が高いことを示す。総合評価は、両評価値の逆数を取り、重み付けを行った値で、高いものほど GA の適応度が高くなる。

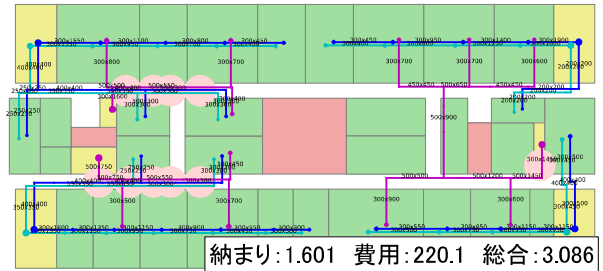
最初に行った廊下を優先して通過する経路探索では、廊下にサイズの大きなダクトが集中し、納まらない箇所が多く発生した。この設計の中で、納まりの評価値がもっとも大きく、総合評価は低い。(図 4-a)

次の知識ベースの探索では、機械室・シャフトに近い系統が、室間を優先して通過する経路に変更され、その分廊下のダクト物量が減少し、納まりが改善されている。総合評価は低下しているが、これは納まりを優先した結果、施工費用が高くなったことによる。(図 4-b)

a) 廊下優先探索



b) 知識ベース探索



c) GAによる探索

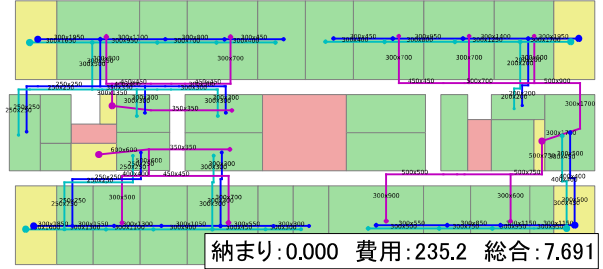


Figure-4 Duct-layouts generated by the present method

最後に GA が適用され、すべての系統に関して最適化を行い、納まり不良の生じないメインダクト経路が生成された。前段階同様、最初のモデルと比較して施工費用は高いものの、スペース納まりが大きく改善され、総合評価はもっとも高い。(図 4-c)

4.2. 空調設備への GA 適用の工夫

続いて、GA による最適化の対象として見たときの、空調設備の性質について述べる。本手法の開発仮定では、局所解が多数存在し、なおかつ脱出が難しいことが見出された。

GA の適用セット回数と、1 セット当たりの個体数・世代数について、異なる組み合わせ(表 2)で探索を行った場合の適応度の変化を図 5 に示す。各条件は、探索過程で発生する個体数の総和が一定となるよう設定されており、計算時間は各条件で概ね等しい。(計算時間は HP 製ワークステーション: プロセッサ周波数 3.8 GHz による)

まず、いずれの条件でも、収束する解は探索ごとに異なっており、局所解が多数存在していることが示唆される。1 セット当たりの個体数・世代数を多く設定した条件 a で

は、適応度の上昇が比較的早く一定水準で止まり、局所解から抜け出せていない(図 5-a)。

一方、1セット当たりの世代数・個体数を減らした条件 b, c では、同じ計算資源でもより平均的に適応度の高い解が得られている (図 5-b, c)。ただし、個体数を減らした条件 c は、条件 b に比べて、得られた解の適用度にバラつきが大きい。この意味では、ある程度の個体数が、解の質の安定には必要と思われる。

これらを踏まえて、本手法では計算資源を GA1 セットの個体・世代数ではなく、GA の適応回数に振り分けることとした。これにより、多様な初期状態から探索を行い、確率的により良い解を得ることを目指している。

また、局所解からの脱出のため、0.6 という高い突然変異率を設定したことも、特筆すべき特徴である。これは他分野で一般的とされる変異率が、高くとも 0.1 程度とされていることに照らして、異例に高い値といえる。

Table-2 Parameters for GA applied in the experiments

	条件 a	条件 b	条件 c
セット数	1	10	10
個体数	60	60	30
世代数	500	50	100
計算時間	721.3 sec	738.7 sec	757.3 sec

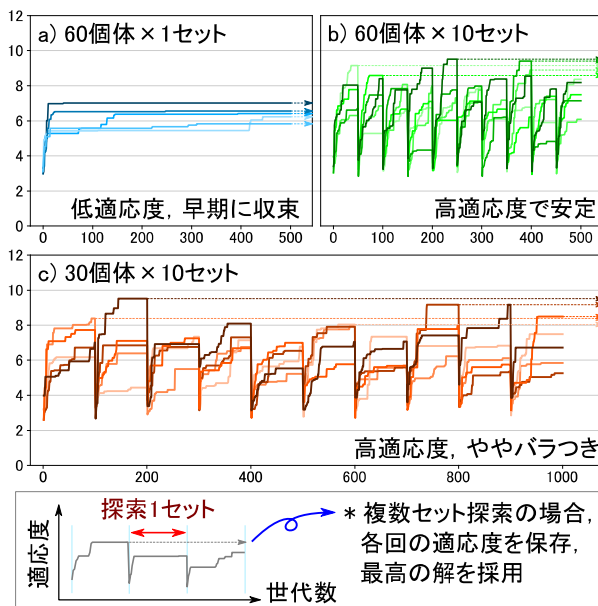


Figure-5 Evolution of the maximum fitness

4.3. まとめと将来の展望

知識ベース・GA 探索を組み合わせた最適化手法により、納まり・施工費用を考慮したメインダクトの計画を自動で生成できた。いずれの計画も、設計者が行う基本的なル

ールに適合しており、概ね妥当な設計をであったといえる。

本手法の大きな特徴は、フロアプラン・空調方式等が決まれば、本格的な計算・作図を要せずに空調設備の要求スペースを大まかに把握できる点にある。計画段階から施工の納まりを検討することで、設計の手戻りを未然に防止し、合理的な空調計画を支援できる。さらに、検討時間の短縮にもつながり、建築生産プロセスのフロントローディングにも資するといえる。

また、室の隣接関係のみで構成される無向グラフを用いることで、フロアプラン、建築部材の変更など条件の変化にも容易に追従できる。本手法の納まり・コスト評価は、区画の検討や空調ゾーニングの最適化などにも適応可能であり、応用の範囲は広い。

一方、GA によって得られる設計にはバラつきが大きく、とくに納まらない箇所が存在する場合に顕著である。この意味で、最適性や精度の面で改善の余地があるといえる。今後実務での使用や施工 BIM の作成を視野に入れるには、事例の蓄積による改善、機械学習の応用などが必要と考えられる。

5. おわりに

本稿では、メインダクトの自動設計手法に関して、以下を報告した。

- 1) 無向グラフによる大域的探索・評価手法
- 2) 知識ベース・GA の段階適用による設計最適化
- 3) 架空事務所空調設備での適用実験
- 4) GA 探索対象としての空調設備の特徴と対策

今回は空調ダクトのみの納まりを評価したが、現実の建築物では電気・衛生設備と合わせた検討が必須となる。今後は他設備にも対応可能な形に発展させ、建築意匠の決定プロセスでの活用など、建築全体の設計プロセスの合理化につながるシステムの自動設計・BIM 作成システムを構築することが望まれる。

参考文献

- 1) 国土交通省建築 BIM 推進会議 2022 建築分野における BIM の標準ワークフローとその活用方策に関するガイドライン (第 2 版)
- 2) 三木秀樹・向来信 2014 空衛設備における自動経路探索の調査と試行 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 第 5 巻
- 3) 白川昌和・荒川雅生・中山弘隆 2010 プラント配置設計の多目的最適化 (第 1 報, 遺伝的アルゴリズムによる構内配置問題の最適設計) 日本機械学会論文集, 76, 342-351