

空間配置案生成手法と進化的多目的最適化手法を用いた建築間取り案作成支援システム

井上, 誠
九州大学大学院芸術工学府

高木, 英行
九州大学大学院芸術工学研究院

<https://hdl.handle.net/2324/4479703>

出版情報 : Transactions of the Japanese Society for Artificial Intelligence : AI. 24 (1),
pp.25-33, 2009. 人工知能学会
バージョン :
権利関係 :



空間配置案生成手法と進化的多目的最適化手法を用いた建築間取り案作成支援システム

Architectural Room Planning Support System using Methods of Generating Spatial Layout Plans and Evolutionary Multi-objective Optimization

井上 誠
Makoto Inoue

九州大学大学院芸術工学府
Kyushu University, Graduate School of Design
mk2inoue@gmail.com, <http://inoue.s201.xrea.com/>

高木 英行
Hideyuki Takagi

九州大学大学院芸術工学研究院
Kyushu University, Faculty of Design
takagi@design.kyushu-u.ac.jp, <http://www.design.kyushu-u.ac.jp/~takagi/>

keywords: layout, evolutionary multi-objective optimization, architecture, artificial life, floorplan

Summary

Firstly, we propose a spatial planning algorithm inspired by cellular automaton and spatial growth rules for spatial planning support, i.e. generating multiple subspaces and making their layouts. Their features are that there is less restrictions in the shapes, sizes, and positions of the generated subspaces and gap sizes among the subspaces are controllable. We also show the framework of our final spatial planning support system that consists of (1) a spatial layout generator including the mentioned algorithm and rules as main parts and a visualization part generating layout diagrams and (2) an optimization part which main components, i.e. evolutionary multi-objective optimization (EMO) and interactive evolutionary computation, optimize the generated spatial plans. Secondly, we make a concrete architectural room planning support system based on some parts of the said framework and confirm that the EMO makes the generated architectural room plans converge, experimentally. We confirm the performance of the system using two EMO's with four and six objectives, respectively. We also evaluate the effect of introducing a niche technique into the EMO to obtain the variety of architectural room plans. The experiments showed that the convergence of each objective over generations and variety of architectural room plans among individuals of higher scores. This experimental evaluation implies that the combination of our proposed spatial planning algorithms and spatial growth rules is applicable to spatial planning support systems.

1. はじめに

集積回路、電子部品の基板配置、出版物及びウェブページのレイアウトデザイン、建築や庭園の設計、地域及び都市計画などの空間配置案作成には技能、知識、経験、美的センスや感性などが必要である。また複数の評価項目を満たすような多目的最適化も多くの空間計画で求められる。さらにこれらの多目的がお互いにトレードオフの関係にある場合や定性的な場合も多く、その最適化は容易ではない。そのため空間計画の支援システムが求められている。

空間配置案作成支援システムを設計するには、まず空間構成をどのように表現するかモデル化が必要である。建築間取りの分野でもこれまでいろいろなモデルが提案されてきた。

セルの組み合わせを使って独立住宅の間取りを最適化する研究 [谷垣 07] では、部屋間に隙間ができることや部屋の形状が矩形にならない課題が残っている。

定形空間の配置による独立建築（病院）の平面計画の研究 [井上 00] は部屋の形状を自由に变化することができないという制約がある。

住戸内の部屋の大きさの最適化に関する研究 [Brintrup 06] では、各部屋の寸法を变化させるだけで、部屋配置位置の変更はできない。

空間二分割の繰り返しによる方法 [Nakano 02] で生成できる部屋の形状は矩形のみであり、その大きさを定義するための情報も別に付加する必要がある。

本研究で扱う空間配置案作成に似た問題としてビン・パッキング問題が上げられるが、ビン・パッキング問題の目的はできるだけ隙間を少なくし多くの物を詰め込む

ことである。この問題は物の向きと位置の最適化を行う。詰め込む物の大きさと形状が固定される点が本論文で扱う問題にない制約である。

上述の空間配置案作成の研究以外に、矩形の部屋の対角 2 座標を設計パラメータとするモデル化も考えられる。しかし、この方法では部屋同士の部分重複や部屋間の隙間が生じやすい。それらのような間取りとして成立しない個体は進化的計算 (EC) において評価することができない。また、作成できる部屋形状が矩形に限られることも間取りの多様性が限られるため不利である (文献 [Inoue 08] の図 1 参照)。

本論文の第 1 の目的は空間配置案を作成する新しい手法を提案することであり、第 2 の目的はこの手法を建築間取り案作成に応用し作成された間取り案が EC 手法によって最適化できることを示すことである。また、人間の経験と知識を最適化に組み込む枠組みも今後の発展研究として同時に示す。最終的な本研究のゴールは、ユーザにとって好ましい多様な空間配置案を提示できる支援システムを構築することで、空間配置計画の未習熟者であっても利用が可能で、空間配置計画の習熟者であれば業務短縮を可能とするシステムを目指している。

以下、第 2 章では、空間配置案生成部と最適化部から構成される建築間取り案生成支援システムの全体構成と本論文で扱う建築間取りについて述べる。第 3 章では、空間配置案生成部を構成する空間生成モデルとその成長方法を制御する成長ルールを提案し、その特徴を述べる。第 4 章では、第 3 章で得られた建築間取り案を進化的手法で最適化する最適化部について述べ、第 5 章で進化的多目的最適化 (EMO) による建築間取り案の最適化を実験的に評価する。

2. 建築間取り案作成支援システム

2.1 全体構成

建築間取り案作成支援システムは空間配置案生成部と最適化部からなる。空間配置案生成部は第 3・1 節の空間生成アルゴリズムと第 3・2 節の成長ルールを核として建築間取り案を生成し、最終的な最適化部は、要求仕様の多制約下で多目的を最適化するための EMO と、経験・知識・感性など定量化が困難な目的をも満たす設計のための対話型進化的計算 (IEC) [Takagi 01] からなる。ただし本論文では IEC の評価を行わない。

図 1 は本論文記述の空間配置案生成部と EMO 部、そして次回研究で展開予定の IEC 部を含む最終的な建築間取り案生成支援システムの全体像を示す。第 3 章で述べる空間生成アルゴリズムと成長ルールは建築間取りに限定されるものではなく、汎用的な空間配置案生成手法であり、図 1 の構成をほとんど変えることなく、他分野の空間配置案生成支援システムとすることができる。IEC を組み込んだ場合は、生成された間取りをユーザが評価

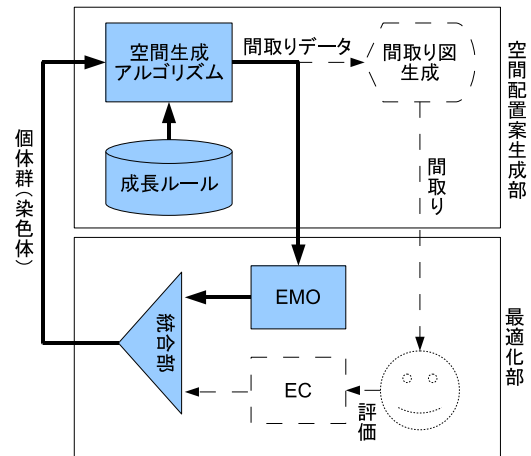


図 1 空間配置案生成部 (上部) と最適化部 (下部) からなる建築間取り案生成支援システム。点線は次回の研究で展開予定の IEC 部分を示す。

できるよう、間取り図として可視化する必要がある。図 1 上半分の空間配置案生成部にはユーザへ可視化した間取り図を提示するための間取り図生成部が、下半分の最適化部には IEC が組み込まれている。本論文では建築間取り案生成支援のために提案した第 3 章の手法とその動作確認及び定量的要素の多目的最適化を論旨としているため、次の研究ステップで展開予定の IEC 部分は第 4 章の評価実験に含めない。

2.2 建築間取り案作成への応用

空間計画は様々な分野にわたるが、本論文では建築間取り案の作成を扱う。具体的には、 $1\text{m} \times 1\text{m}$ のセルを最小単位 (モジュール) とし、集合住宅 (例えば図 2 のような) の $7\text{m} \times 7\text{m}$ 住戸の間取り案を作成することとする (図 3)。

日本の伝統的家屋建築では、メートル単位 (1,000mm) ではなく三尺 (910mm など) を最小単位とする事も多いが、本論文では現代的な集合住宅の住戸を扱うので 1m を最小単位とした。また一般的な鉄筋コンクリート造では $7\text{m} \times 7\text{m}$ が経済的にも理にかなったもの (経済スパン: スパンは平面における構造体のピッチ、または柱間の距離) と言われている。一級建築士資格試験の設計課題においても $7\text{m} \times 7\text{m}$ を基本としている事が多い。実際の設計では状況に応じて多少の変動はあるが、本論文

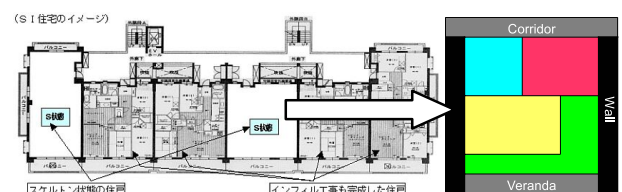


図 2 集合住宅と住戸の間取り例。左図は、国土交通省 WEB ページより「スケルトン・インフィル (SI) 住宅」(※図とモデルの縮尺は異なる)

での問題設定もこのスパンを用いる。

本論文ではこの住戸内に居間、台所、水廻り、寝室の4部屋の配置案を作成する。計画範囲の周囲は、平面図の上方向が北とすると、北側を共同廊下（玄関側）、東西側を隣接住戸の壁、南側をこの住戸のベランダとする。この周囲は空間生成アルゴリズムにおける成長の限界点（障害物）としての機能も果たす。

各部屋の境界は壁を意味する。実際の建築ではその壁に出入り口や窓などを設置する必要があるが、本論文の間取り案作成支援システムではそれらの具体的な位置の決定は行わない。また本システム上では壁の厚みも表現していない。

3. 空間配置案生成部

3.1 空間生成アルゴリズム

第1章で述べたこれまでの研究では困難であった以下の2点を目指した空間生成アルゴリズムを提案する。

- (1) 計画する部屋の大きさ、形状、位置が可変
- (2) 無駄な隙間が少ない

ここでアルゴリズムの概略を述べる。まず、各部分空間（本論文の場合は部屋）の成長開始座標点である「種」を計画範囲空間に配置する。次に、種から近い距離の点（本論文の場合はセル）の集合をその種の部分空間とする。距離の定義とその測定ルール、及び種座標を制御することで空間配置案生成を行う。

建築間取り案生成に応用する空間生成アルゴリズムを以下に示す。ここでの空間は離散化されたセルで構成されているものとし、座標と距離はこのセルで表わす。種座標からの距離に基づいて部分空間を徐々に形成することを、本論文では「成長」と表現している。

- (1) 各部屋の成長開始点（種）を $m \times n$ セル上へランダムにあるいは知見に基づいて初期配置する。
 - (2) 各部屋を隣接セルへ成長させる。
 - (3) 成長方向に他の部屋や壁などの障害物がある場合はその方向へは成長しない。
 - (4) 上記(2)と(3)を成長できなくなるまで反復する。
- このアルゴリズムは、セルラーオートマトンにヒントを得たものである。

この空間生成アルゴリズムを部屋の間取り作成支援システムへ応用する場合、部分空間が部屋に、全体空間が居住空間になる。図3はアルゴリズムに基づいた部分空間の成長過程の概要を示す。

以上の本提案空間生成アルゴリズムを今後改良していくための理論的背景として、ポロノイ図との類似性の視点から提案アルゴリズムを解釈することが有用であると思われる。本アルゴリズムで形成される部分空間は種座標に支配されるので、離散ポロノイ図、長方形ポロノイ図 [Okabe 00] に近い性質を持っている。ポロノイ図も growth model による解釈が可能 [Okabe 00] であり、本

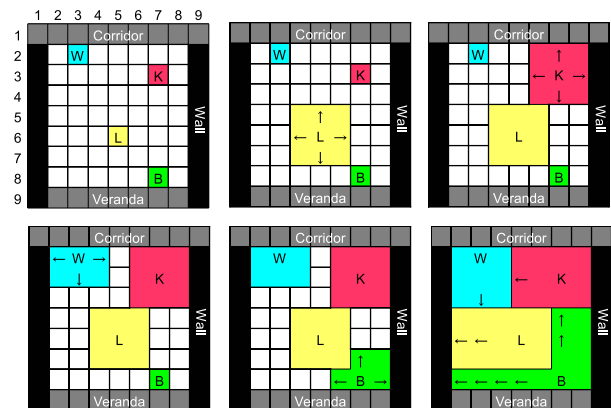


図3 提案アルゴリズムに基づく建築間取りの成長過程の例。成長の順序は上段の左から右へ、そして下段の左から右へと進む。L, K, W, B は居間、台所、水廻り、寝室を表す。

空間生成アルゴリズムの各部屋（空間）を逐次的に成長させることは、このポロノイ図の性質に矛盾するものではない。

ポロノイ図は母点からの距離によってポロノイ領域を定義するため、その領域形状は距離の定義に依存する [Okabe 00]。今後の展開として逐次成長ではなく、ポロノイ図のアルゴリズムで間取りを一括生成する場合は、直接ポロノイ図の視点から生成形状が解析できる。例えば、市街地距離を用いれば部分空間の境界線は水平・垂直だけでなく45度や135度などのものにすることができ、カールスルーエ距離を用いれば部分空間の境界線はある中心から出る放射線と円弧の組合せにすることができる。更には線ポロノイ図などを使用することも考えられる。

3.2 成長ルール

第3.1節の空間生成アルゴリズムの枠組みの下で、部分空間の成長形成方法（成長の方向、順序、成長量、他の部分空間との衝突時の成長制限方法など）を記述したものが成長ルールある。前節の空間生成アルゴリズムがいろいろな分野の空間配置問題に対する1つの共通思想を定義しているのに対し、成長ルールは空間配置の応用問題毎に、部分空間の成長形成の方法を設計しておく点が異なる。

距離定義と種座標からの距離計測方法によっていろいろな部分空間形状が形成できる他、成長方法や他部分空間との衝突対処法でいろいろな形状生成が可能になる。

成長方法には、例えば次のような例が考えられる。

- 4方向のうち n ($=1, 2, 3, \text{ or } 4$) 方向ずつ順に成長させる場合、
- 斜めセル方向に成長させる場合とさせない場合、
- 各部分空間が同時成長する場合と順に成長する場合、
- 成長速度が全部分空間で同じ場合と部分空間毎に異なる場合、
- 成長速度が全ての成長方向で同じ場合と方向毎に異

なる場合、など。

また成長してくる他の部分空間に接した時の対応にもいろいろな対処処理が考えられる。大別すれば、

- 一部分でも接した時にはその方向の成長を全ての部分空間のセルについて止めるとする場合、
- 接していないセルのみ成長を続ける場合、

の 2 つの処理がある。前者では部分空間の間に隙間が生じることがあり、後者では部分空間が正方形、長方形以外の不整形形状になることが多い。

このように成長ルールによって空間配置結果が異なるため、計画分野や要求仕様によって成長ルールを調整したり修正したりする必要がある。建築間取り案作成の場合の一般的な要求仕様では、生成する空間は矩形を基本とし、その一部が欠けた L 字形や十字形などの形状までにしたいと言うものが考えられるが、成長ルールはそれらの部屋形状が生成可能となるように調整及び修正をする必要がある。

以上を踏まえ、本論文での建築間取り案作成で用いる成長ルールを次のように設定する。

- 各部屋は同時ではなく順に成長する。
- 各部屋の成長方向について、
 - 上下左右成長方向の各々の隣接セルに障害物や他の部屋がなければ、その方向へ成長できる。
 - 障害物や他の部屋がある場合はその方向への成長をここで終える。
 - 既に成長した隣接する上下左右方向の合成方向である斜め方向について、もし障害物や他の部屋がなければ、成長する。

3.3 空間生成アルゴリズムと成長ルールの特徴

各部屋の種座標をランダムに生成し、提案アルゴリズムと成長ルールで部屋を成長させて得られた間取りの特性を観察する [Inoue 08]。これは図 1 の空間配置案生成部（上部）出力であり、まだ最適化部処理は行われていない。提案のアルゴリズムと成長ルールが間取りを生成できるかを確認することがここでの目的である。

観察によると、生成される部屋の形状は基本的に長方形や正方形であり、さらに L 字形、凸形、十字形などの四角形の角の一部が欠けた形状の部屋も作成できる（第 5 章の実験結果の出力例である図 7 参照）。

間取りにはそれほど大きな隙間を作ることがない。隙間ができる場合でも、幅 1m 程度に留まっている（図 7 上段・右から 2 番目の個体と下段・右から 2 番目の個体と図 8(b) 下段・右から 2 番目の個体の中央部分）。止まってしまった成長方向には再度成長しないという成長ルールによってこの隙間は生じている。

部屋座標（種）の重なりがある場合、間取りにおいて現れない部屋が生じる。必要な部屋数を確保するためには、部屋の成長開始点（種）座標の生成時にシステムは部屋座標の重なりの有無を確認する必要がある。部屋形

状が L 字形の場合、建築計画的に見て細く長くなりすぎることがある。これを回避するためには、あるステップで成長を止める必要がある。

本空間生成アルゴリズムと成長ルールでは、長方形の単純な組み合わせの間取り、他の部屋で囲まれた島状態で計画範囲の端の障害物に接していない部屋を持つ間取り、L 字形の部屋を持つ間取りも生成できる。しかし“「」”のような L 字形の向かい合った組み合わせは生成できない [Inoue 08]。

空間配置案生成部には、間取り案を制御する 3 つの要因、つまり部屋種座標の初期値、成長順序及び成長速度がある。

部屋種座標の初期値は、部屋の配置と位置決定において支配的な要因である。また部屋の種の位置関係が部屋の大きさを決定している。

どの部屋から成長させるかの成長順序も生成間取り案に影響を及ぼす。今回の間取りの基本設定で、間取りの最小単位であるセルは 1m 単位の離散データである。そのため種の間のセル数が奇数である場合は、当然このシステムはその中央（セルの中）に境界線を引くことが出せない。この場合どちらか一方の部屋がそのセルを埋めることになる。そこで複数の部屋の間には優先順位が必要となる。優先順位つまり成長ステップの順序が、競合する位置にあるセルがどちらの部屋になるかを決定する要因となっている。なお、セルの最小単位をもっと細かいものにすれば、近似的ではあるが、各部屋の成長プロセス順序をなくし同時とすることもできる。

成長速度は、主に部屋の形状に影響を与える。矩形だけでなく L 字形や凸形などの部屋生成を可能にし、また制限することもできる。成長プロセスにおいて、次の成長方向に障害物や他の部屋がある場合、実験で用いた成長ルールは、それ以降のその方向への成長を止める。この部屋形状への制約は、隙間が生じる要因にもなっている。成長ルールの例外処理や時間的な変更によって隙間を回避できることもある。

このアルゴリズムを用いた間取り生成では、個体の持つべきデータは種座標だけであり、部屋の寸法や向きに関する情報は不要である。そのため、第 4 章の EC 手法による最適化時には、染色体の情報量を比較的少なくすることができる。

各セルの部屋割当ての組合せ数、つまり間取り総数について、次の 3 種類の方法で検討を行う。

- (1) $7 \times 7 = 49$ のセルをそれぞれ独立にランダムに 4 種類の部屋に割り当てる場合の、組合せ数は $4^{49} = 3.1691265e^{29}$ 通りになる。
- (2) $7 \times 7 = 49$ のセルを一つの空間として二等分して行きそれを 3 回繰り返して 4 つの部屋を作る（正方形と長方形のみ）場合、文献 [Nakano 02] では、その間取り総数は 49,344 通りである。これは同じ条件である $7 \times 7 = 49$ のセルの場合で、分割パターンと線引

きの選択数より算出した。

- (3) $7 \times 7 = 49$ のセルの中に 4 種類の種の取り得る組み合わせ数は ${}_{49}P_4 = 49 \times 48 \times 47 \times 46 = 5,085,024$ 通りである。これにさらに成長させる部屋の順序を考慮すると、4 部屋の場合は $4! = 24$ 通り乗算され、122,040,576 通りとなる。ただし、本提案アルゴリズムでは種座標の組合せが異なる場合でも同じ間取りになることがあるため、生成され得る間取りの総数は 122,040,576 通りよりも少ない。実際のパターン数は計算が実験により確かめる必要がある。

以上の間取り総数を表 1 にまとめる。

表 1 間取り総数

独立セル・ランダム	4^{49} 通り
二分手法 [Nakano 02]	49,344 通り
本提案手法	122,040,576 通り未満

提案アルゴリズムと成長ルールは空間配置対象問題に必要な部分空間の形状を作成・維持することができ、さらに最適化を行う探索空間を限定することができるので空間配置案生成にとって有用である。

4. 最適化部

4.1 間取り問題の多目的

本研究では EMO によって間取りの最適化を行うため、各部屋（部分空間）の種座標の集まりを染色体と定義する。例えば、図 3 左上の染色体は $[(6,5),(3,7),(2,3),(8,7)]$ のように表現される。なお、図の左上を原点とし、下方向の座標、右方向の座標の順に部屋数分の座標組を記述している。

建築間取りに対する評価項目は多数ある。それらは具体的には、各部屋の床面積及び形状、動線等の居住者の利便性、採光などの建築関係法令への適合性、配管長や壁長等の経済性などである。また、好みなどの主観評価項目もある。本論文では EMO で最適化するこれらの定量的な多目的として以下の 6 目的を定義する。第 5 章の評価実験では、これらから 4 目的の最適化と 6 目的の最適化実験を行う。また、計画要件や計画意図によってはこれ以外の目的も当然あり得る。さらに本研究では今後 IEC の導入によって定性的評価も 7 番目の目的として導入する予定である。

各フィットネス関数への入力値は、生成された間取り図から求める。

【目的 1：床面積】

住戸全体の床面積を 49 m^2 とした場合の各部屋の床面積の目標を居間=16 m^2 、台所=12 m^2 、水廻り=9 m^2 、寝室=12 m^2 とする。次に部屋 i の床面積 a_i と目標床面積 $\hat{a}_i$ からこの部屋のフィットネス関数 $f_i^1(a_i)$ を図 4(a) のように定める。間取り全体の床面積仕様に対するフィッ

トネス値をこれら 4 部屋のフィットネス値の総和 ($f^1 = \sum_{i=1}^4 f_i^1(a_i)$) で表す。

【目的 2：部屋形状】

部屋毎に 2 つのフィットネス関数と形状重要性の重み係数を用意し、これを総合して目的 2 に対するフィットネス値を求める。

第 1 に、部屋 i の短辺長/長辺長比を r_i とし、この部屋の縦横比に対するフィットネス関数 $f_i^2(r_i)$ を図 4(b) のように定める。建築の部屋の平面形状は細長くなると一つの部屋として使い難くなる。建築計画学や建築士試験の設計課題対策においても r_i は 1(1:1) から最悪でも 0.5(1:2) の範囲であることが求められている。[谷垣 07] でもその範囲を基準としている。第 2 に、部屋形状の矩形状の度合いとして g_i^2 を (床面積 a_i)/(部屋 i を全て含有する最小の四角形の面積) と定めた。本システムの生成する部屋の形状は矩形だけではなく、矩形状の角のいくつかが欠けた L 字形や凸形などの形状もある。部屋形状は矩形が理想的であり、それ以外の場合は部屋形状のフィットネス値をその欠け具合に応じて下げるために g_i^2 を用いる。第 3 に、部屋に種類によって形状の重要性が異なるため各部屋の形状に対して重み付け w_i をする (居間=0.75、台所=0.5、水廻り=0.1、寝室=1.0)。

以上より、間取り全体に対する部屋形状のフィットネス値を、 $f^2 = \sum_{i=1}^4 (w_i \times f_i^2(r_i) \times g_i^2)$ で表す。

【目的 3 動線（部屋間の隣接関係）】

今回は住戸内に廊下を設置しない場合を想定している。そのため部屋の性格をパブリックとプライベートの二つに分類し、パブリックな性格の部屋を通過経路（廊下）として利用できるものとする。パブリックな部屋（通過経路とできる）は居間と台所であり、プライベートな部屋（通過経路とできない）は寝室と水廻りとする。

間取りの動線が建築計画的に見て成立するには、共同廊下から住戸にアクセスし各部屋を経由してベランダに出ることができるかを確認する必要がある。そのため以下の部屋間の隣接関係を調べる。

- 共同廊下 ⇔ 居間 or 台所
- 居間 ⇔ 台所
- 居間 or 台所 ⇔ 水廻り
- 居間 or 台所 ⇔ 寝室
- 居間 or 台所 ⇔ ベランダ

上記 5 つの隣接関係を各々の隣接関係ルール毎に 1 点を加算し動線に関するフィットネス値とする。

【目的 4 採光（窓面積）】

建築基準法第二十八条により各居室（ただし建築基準法第二条により水廻りは居室ではない）の床面積の 1/7 以上の採光（窓）面積を取る必要がある。居間と台所が接する場合は襖等の可動式間仕切りで仕切る場合を考慮する。採光は共同廊下に接する壁に 1 m^2/m 、ベランダに接する壁に 2 m^2/m 取ることができるものとする。フィットネス値は 1/7 以上取れる場合を 1 とし、それ以外をそ

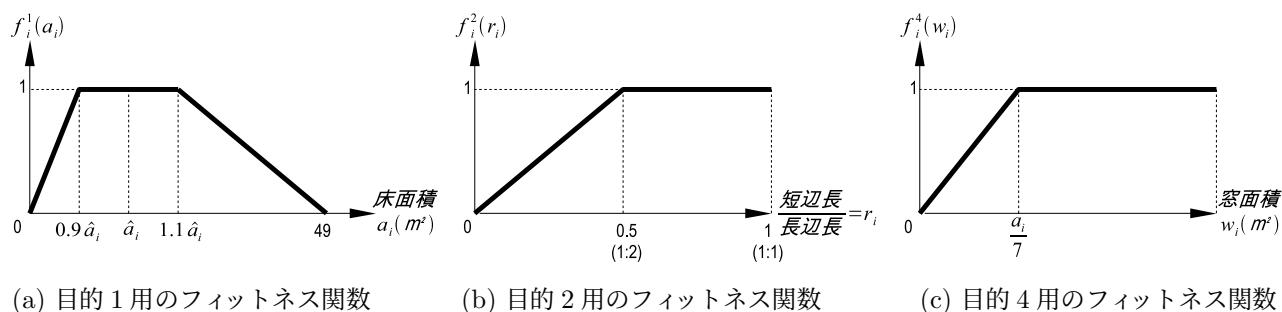


図 4 目的 1, 2, 4 用のフィットネス関数. (a) 部屋 i の目標面積 $\hat{a}_i$ を与えた時の床面積 a_i に対するフィットネス. (b) 部屋 i の平面形状の縦横比 r_i に対するフィットネス. (c) 部屋 i の床面積 a_i を与えた時の採光 (窓) 面積 w_i に対するフィットネス.

の度合いに応じて 0 から 1 とする (図 4(c)). 間取り全体の採光に関するフィットネス値 f^4 をそれらの総和で表す.

【目的 5 住戸内壁長】

計画する 4 部屋間で隣接するセルの辺数を加算することで住戸内壁長を求め、経済性の指標とする. EMO での他の目的と合わせるため、フィットネス値はこの数値の逆数で定義する. また、この住戸内壁は構造体ではなく、建築の躯体と比べると経済的影響はそれ程大きくないため、4 目的実験ではこの目的 5 は含めない.

【目的 6 住戸内給排水管長】

今回の実験では台所と水廻りの各セル間のユークリッド距離の平均をその長さとする. EMO での他の目的と合わせるため、フィットネス値はこの数値の逆数で定義する. 給排水管長に依存するコストは建築の躯体と比べると経済的影響はそれ程大きくないため、4 目的実験ではこの目的 6 は含めない. なお、通常はパイプスペースからの距離も考慮し経済性の指標とする. また配水管は排水勾配が必要となる. 集合住宅においてパイプスペースの位置や範囲が限定されることが多い. またメーターボックスも必要とされ一般に共同廊下側に面する位置に配置される.

4.2 最適化部の手順

最適化部では以下の手順で処理を行う.

- (1) 空間配置案生成部で作成された各間取りを目的毎に評価をする.
- (2) 得られた評価値に基づきパレートランク [Fonseca 93] を計算する.
- (3) 間取りの個体間距離を求め、ニッチカウント [Deb 01] を計算する.
- (4) パレートランクとニッチカウントに基づいた各個体の適応度を求める.
- (5) 適応度に基づき、EC 演算を行い、次世代個体を生成する.
- (6) 子個体である部屋の成長開始点 (種) 座標が計画範囲に合致しない、あるいは複数の種座標の一致が

ある個体は致死個体として破棄し、再度 EC 演算をやり直す.

- (7) 以上の手順を個体数分の子個体が得られるまで繰り返す.

- (8) 得られた個体数分の染色体を次世代個体として空間配置案生成部へ返す.

本論文の評価実験では、第 5.1 節の表 2 に示すように、ルーレット選択、バイナリ変換した後の一様交差、突然変異を上記 EC 演算処理としている.

5. 評価実験

5.1 実験条件

評価実験の目的は、空間配置案生成部で生成された間取りを最適化部で多目的最適化できるかどうかを確認することである. その際に目的の収束性と解としての間取りの多様性について観察する. 評価実験は、4 目的 (目的 1~目的 4) の場合と 6 目的 (目的 1~目的 6) の場合とで行う. 実験条件を表 2 に示す.

表 2 実験条件

試行数	10
目的数	4 と 6
世代数	50 世代
個体数	21 個体
選択方法	ルーレット選択
突然変異率	1%
交差率	100%
交差方法	一様交差
ニッチの境界閾 σ_{share}	セル数 (49)/4

なお、各目的の数値 (フィットネス) は最大値 (最適値) が 1 になるよう正規化している. 図 1 でも示したように今後の研究展開では IEC 導入を考えているため、最適化部でユーザに提示できる画面上の間取り関数を考慮し、個体数を一般の EMO より少ない 21 とする. 実験での空間配置案生成部では部屋の成長順序を寝室→水廻り→台所→居間としている. 成長の順序は部屋の大きさも影響を及ぼす [Inoue 08] ので大きくしたい部屋を早

い順序にした方が自然であるということもできる。一方、これを打ち消すような種の位置を求めることができれば好ましい間取りを得ることも可能だということもできる。このことから今回は目標とする部屋の大きさはあえて考慮しない成長順で間取りが最適化できるかも確認するために任意のひとつであるこの成長順序とした。また、それぞれの試行において4目的と6目的とで各部屋の成長開始点(種)の乱数初期値は同じものを用いて比較実験を行っている。

実験でのEMOにはMultiple Objective Genetic Algorithm (MOGA) [Fonseca 93]を用いる。MOGAはその構造等がシンプルであり、かつ、ニッチングによる目的空間における解の広がりを求めるのに適している[Deb 01]ためである。

本論文のMOGAと通常のMOGAとが異なる第1の点はパレートランキング法である。通常のMOGAで用いるパレートランキング法[Fonseca 93]では比較対象の個体から優越されている場合にのみランクを下げるのに対し、本論文では弱パレート解の位置となる場合にもランキングを下げていく。その理由は、本論文で扱う間取り最適化問題では目的3(動線)や目的4(採光)が他の目的と比べて収束しやすく、また同じ数値になりやすいため、通常のパレートランキング法では個体間の差が生じ難いからである。今回設定した間取り問題の目的の値はこのように最良値である1や同じ数値になる個体が多く、つまり弱パレート解の位置にある個体が多く存在する(図5)。通常のパレートランキングのように弱パレート解の個体もランキングを下げないことにすれば、個体間の優劣が付き難いためECが進まないことになる。このことを確認するため通常のランキング方法で実験を行ったが、まったくECが進展していない(図6)。一方、本論文提案のパレートランキング法では各目的共に進展が見られる(図9(a))。

本論文のMOGAと通常のMOGAとが異なる第2の点は、ニッチングにおける個体間距離 d の算出方法である。建築間取り計画への応用で求められる多様性は「目的空間」ではなく表現型である「間取り」においてである。通常のMOGAであればニッチングは目的空間で行われるが、目的空間において近い個体であっても間取りがまったく違う個体もありえるため、本論文では表現型である建築間取り図についてニッチ計算を行う。個体間距

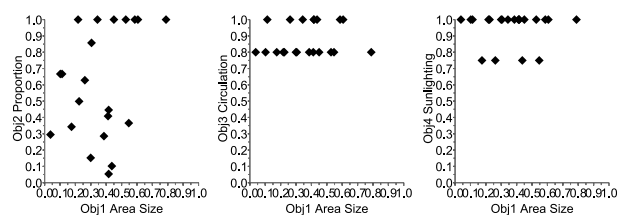


図5 試行1, 第1世代の4目的中2目的の目的値関係性。Objは目的を示す。

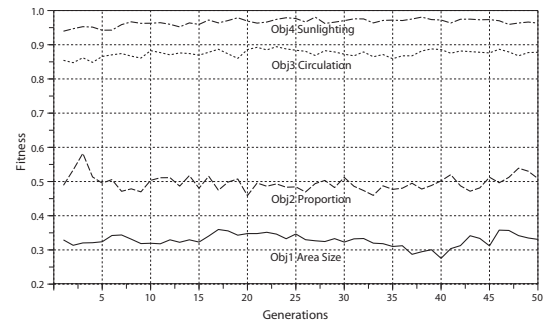


図6 通常のパレートランキング法(弱パレート解もランクを下げる)による10試行平均の4つの目的の収束特性。各収束曲線は、Obj1=床面積、Obj2=部屋形状、Obj3=動線、Obj4=採光の目的に対する収束特性を表す。

離 d の具体的計算方法は、同じパレートランクの個体間で間取りの各セルを比較し、違う部屋であれば個体間距離 d に1を加算する。それをすべてのセルについて行う。

5.2 評価実験結果

図7はランダムに初期化した部屋の成長開始点(種)から空間配置案生成部が生成した間取り図(最適化部でのEMO最適化を行う前)である。空間配置案生成部の目標である部屋の形状と隙間問題を克服し様々な間取りが作成できることを示している。

これらを第1世代の個体群として4目的で最適化を行った第50世代目の間取りを図8(a)に示す。4目的を満たす幾つかの間取りが生成できている。ただしこの例の多くの個体は台所と居間が入れ替わった2種類の間取りに限られている。世代-目的値の図9(a)においても4目的すべてにおいて第25世代目前後で一応の収束点に達する様子が観察された。

目的数を6つにした場合の間取り(図8(b))は給排水管の長さに関する目的を追加したため、台所と水廻りが近接する間取りが多く見られる。一方で、多目的間でのトレードオフ関係が生じるためか、床面積と部屋形状に関する目的に合わない間取りも多くなっている。4目的最適化では特に床面積の目的(Obj1)と部屋形状の目的(Obj2)が顕著に収束した(図9(a))が、6目的最適化

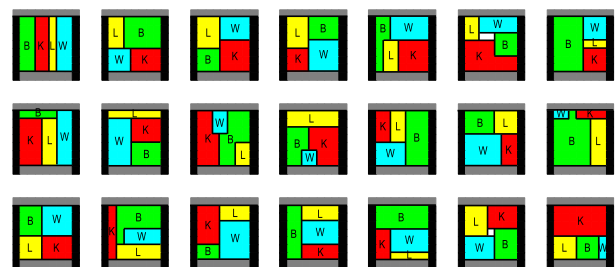
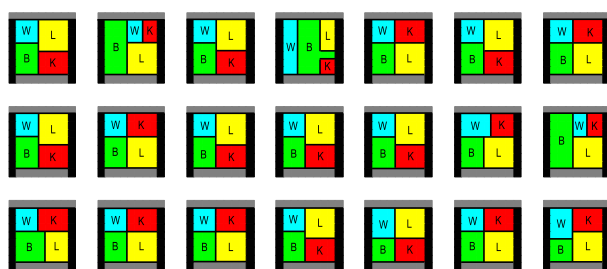
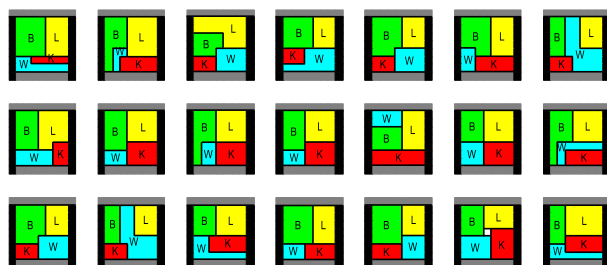


図7 第1世代の間取り図例。凡例: 緑色(B)=寝室, 水色(W)=水廻り, 赤色(K)=台所, 黄色(L)=居間。ただし、ここでのB,W,K,Lは種の位置を表すものではない。



(a) 4 目的



(b) 6 目的

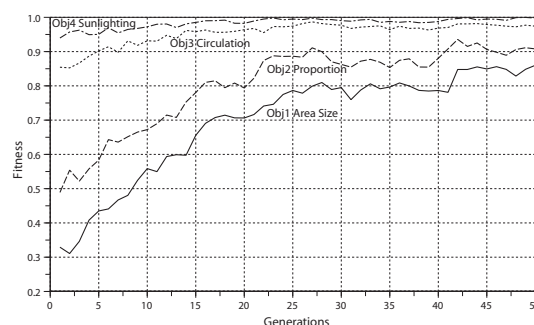
図 8 最適化した第 50 世代目の間取り図例。凡例は図 7 と同様。

では全ての目的で収束の改善が乏しい (図 9(b))。1 世代から 25 世代までにおいて極僅かに進展が見られるものの、それ以降はほとんど改善は見られない。参考として 6 目的で 1000 世代までの実験を行ったが進展は見られなかった。

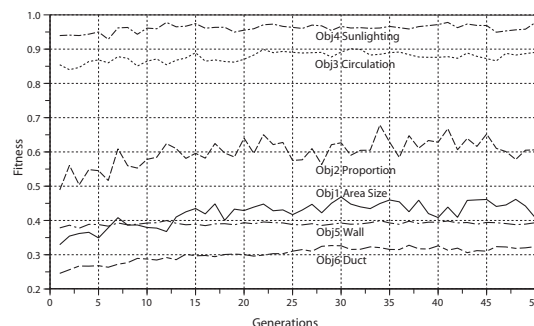
6. 考 察

今回の実験結果では、4 目的最適化では各目的で十分な収束が得られた一方で、解の多様性は十分ではなかった (図 8(a))。次の研究ステップとして定性的目的に対応するための IEC 導入することを前提に個体数を 21 としたが、これは通常の EC 手法に比べて少ない個体数であり、この点も解の多様性に影響している可能性がある。最近の IEC 研究では IEC ユーザの評価特性を学習し、疑似ユーザとして多数の個体数でシミュレーションを行いながら人間の評価と組み合わせる疲労軽減手法が多く提案されるようになってきた [Henmi 06, Machwe 06, 長尾 98, 大崎 98] ので、少数個体数であっても多様性が得られる研究の進展も将来期待できる。しかしながら、IEC ユーザそのものが評価する個体数が増える訳ではないので、IEC 導入を前提にする限り、目的関数の設定やニッチング・パラメータの調整などで多様性維持を行うことも並行して探求していく必要がある。

6 目的最適化の場合、多数目的になってしまうためパレートランキングによる EC の性能が著しく低下している (図 9(b))。この傾向は石淵らの報告 [石淵 07] と合致する。これは個体数の大小に関わらない現象であると考えられる。現時点では目的数を減らす、あるいはパレートランク以外の方法によるフィットネス値の導入などが



(a) 4 目的



(b) 6 目的

図 9 10 試行平均の収束特性。各収束曲線は、Obj1=床面積、Obj2=部屋形状、Obj3=動線、Obj4=採光、Obj5=壁長、Obj6=管長の目的に対する収束特性を表す。

解決策として提案されている。これは今後の研究テーマのひとつであると考えられる。

住戸内壁と住戸内給排水管の経済性は建築躯体と比べて一般に小さく、これらの目的は他の 4 目的と比べ重要性は低いと考えられる。また、他の 4 目的によって妥当な部屋の生成が確かめられたので、この 4 目的によって今後のシステム構築を進めることができる。今後、IEC を導入することで多数目的空間での最適化すべき方向 (ベクトル) をユーザが示すことが可能になる期待もある。

7. 結論と今後の課題

本論文では、まず、汎用的な部分空間の配置問題に利用できる空間生成アルゴリズムと成長ルールを提案した。次に、これらからなる空間配置案生成部と EMO 部による最適化部で構成される建築間取り案作成支援システムを構築した。IEC 部分を外したシステムで評価実験を行った結果、EMO による 4 目的最適化の場合には最適化された間取りを得ることができ、研究の第 1 ステップの目的である、提案アルゴリズムと成長ルールで生成された建築間取りが多目的最適化されることの検証を満した。

研究の第 2 ステップは、IEC の導入による評価と複雑な建築間取り案生成問題での評価である。多くの空間配置問題では経験、知識及び美的感覚などに基づく視覚的評価が求められることが多々あるが、これらのフィットネ

ス関数を設計することは容易ではなく IEC の導入が有用になる [Kamalian 04] ことが考えられる。また、間取り対象を家族世帯向けの床面積が広く部屋数も多い住戸にすることで、間取り探索空間が広がる。これらの大型住戸の建築間取り問題での性能評価、及び建築設計の経験のない一般ユーザと建築設計士の両方のグループで建築間取り案生成支援システムを評価することが次のステップに含まれる。

研究の第3ステップは、造園計画で要求されるような曲線による領域分割や2階建て以上の建築のような3次元空間の配置問題へと進む。

謝 辞

本研究の一部は文部科学省 21 世紀 COE プログラム及び科学技術振興機構平成 19 年度シーズ発掘試験から支援を受けた。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Brintrup 06] Brintrup, A. M., Takagi, H., Tiwari, A., and Ramsden, J. J.: Evaluation of sequential, multi-objective, and parallel interactive genetic algorithms for multi-objective optimization problems, *Journal of Biological Physics and Chemistry*, Vol. 6, pp. 137–146 (2006)
- [Deb 01] Deb, K.: *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*, John Wiley & Sons Inc., Chichester (2001)
- [Fonseca 93] Fonseca, C. M. and Fleming, P. J.: Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization, in *Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms (ICGA'93)*, pp. 416–423, Urbana-Champaign, IL, USA (1993), Morgan Kaufmann
- [Henmi 06] Henmi, S., Iwashita, S., and Takagi, H.: Interactive Evolutionary Computation with Evaluation Characteristics of Multi-IEC Users, in *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC2006)*, pp. 3475–3480, Taipei, Taiwan (2006), IEEE
- [井上 00] 井上 貴智, 小浜 芳朗, 高田 豊文: 最適化手法を用いた建築平面計画に関する研究, 日本機械学会最適化シンポジウム講演論文集, pp. 281–285 (2000)
- [Inoue 08] Inoue, M. and Takagi, H.: Layout Algorithm for an EC-based Room Layout Planning Support System, in *Proceedings of IEEE Conference on Soft Computing in Industrial Applications (SMCia/08)*, pp. 165–170, Muroran, JAPAN (2008), IEEE
- [石淵 07] 石淵 久生, 塚本 実孝, 能島 裕介: 進化型多数目的最適化, 進化計算研究会進化計算シンポジウム 2007 講演論文集, pp. 47–50, 洞爺湖, 北海道 (2007)
- [Kamalian 04] Kamalian, R. R., Takagi, H., and Agogino, A. M.: Optimized Design of MEMS by Evolutionary Multi-objective Optimization with Interactive Evolutionary Computation, in *Proceedings of Genetic and Evolutionary Computation (GECCO2004)*, pp. 1030–1041, Seattle, WA, USA (2004)
- [Machwe 06] Machwe, A. and Parmee, I. C.: Integrating aesthetic criteria with evolutionary processes in complex, free-form design – an initial investigation, in *Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC2006)*, pp. 165–172, Vancouver, BC, Canada (2006)
- [長尾 98] 長尾 光悦, 山本 雅人, 鈴木 恵二, 大内 東: インタラクティブ GA に基づく画像検索システムの評価, 人工知能学会誌, Vol. 13, No. 5, pp. 720–727 (1998)
- [Nakano 02] Nakano, S.: Enumerating Floorplans with n Rooms, *IEICE Trans. on Fundamentals*, Vol. E85-A, No. 7, pp. 1746–1750 (2002)
- [大崎 98] 大崎 美穂, 高木 英行: 対話型 EC 操作者の負担軽減 – 評価値予測による提示インタフェースの改善 –, 人工知能学会誌, Vol. 13, No. 5, pp. 712–719 (1998)
- [Okabe 00] Okabe, A., Boots, B., Sugihara, K., and Chiu, S. N.: *Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams*, John Wiley & Sons Inc., Chichester (2000)
- [Takagi 01] Takagi, H.: Interactive Evolutionary Computation: Fusion of the Capabilities of EC Optimization and Human Evaluation, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 89, pp. 1275–1296 (2001)
- [谷垣 07] 谷垣 進也, 谷 明勲, 山邊 友一郎: 多重最適化による動線及び室形態の最適化システム – 室接続に複数経路を有する場合における住宅室配置の最適化 –, 日本建築学会, 第 30 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, 論文, pp. 7–12, 東京 (2007)

[担当委員: 大林 茂]

2008 年 6 月 10 日 受理

著 者 紹 介



井上 誠

1993 年九州芸術工科大学大学院芸術工学研究科生活環境専攻修士課程修了, 修士 (芸術工学)。1993 年～福岡市役所, 1995 年～福岡教育大学施設課, 1997 年度文部省大臣官房文教施設部福岡工事事務所 (併任), 1999 年～九州大学施設部建築課, 2001 年～現在設計業自営。2006 年～現在九州大学大学院芸術工学府博士後期課程在籍。電子情報通信学会, IEEE, 日本建築学会各会員。一級建築士。



高木 英行 (正会員)

1981 年九州芸術工科大学修士課程修了。1981～1995 年松下電器産業 (株)。1991～1993 年 UC Berkeley 客員研究員。1995 年九州芸術工科大学助教授, 現在九州大学准教授。博士 (工)。計算知能等の研究に従事。電子情報通信学会篠原記念学術奨励賞 (1989), 最優秀論文賞 (KES'97, IIZUKA'98, ICOIN-15), 功労賞 (スロバキア AI 学会 2002, IEEE SMC 学会 2003), IEEE SMC 学会 Best Associate Editor 賞 (2005), 知能情報ファジィ学会論文賞 (2003), 各受賞。IEEE SMC 学会 Vice-President (2006–2009)。