JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	プロシージャルモデリングによる階層的3次元ダンジョンの制作支援
Author(s)	大川，将広；謝，浩然；宮田，一乗
Citation	研究報告コンピュータグラフィックスとビジュアル情報学（CG），2021-CG-181(7)：1-8
Issue Date	2021-02-09
Type	Journal Article
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/17060
Rights	社団法人　情報処理学会，大川 将広，謝 浩然，宮田 一乗，情報処理学会研究報告．CG，コンピュータグラフィックスとビジュアル情報学，2021-CG-181(7)，2021，pp.1-8．　ここに掲載した著作物の利用に関する注意：本著作物の著作権は（社）情報処理学会に帰属します。本著作物は著作権者である情報処理学会の許可のもとに掲載するものです。ご利用に当たっては「著作権法」ならびに「情報処理学会倫理綱領」に従うことをお願いいたします。 Notice for the use of this material: The copyright of this material is retained by the Information Processing Society of Japan (IPSJ). This material is published on this web site with the agreement of the author (s) and the IPSJ. Please be complied with Copyright Law of Japan and the Code of Ethics of the IPSJ if any users wish to reproduce, make derivative work, distribute or make available to the public any part or whole thereof. All Rights Reserved, Copyright (C) Information Processing Society of Japan.
Description	

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

Vol.2021-CG-181 No.7
2021/2/16

プロシージャルモデリングによる階層的3次元ダンジョンの制作支援

大川将広[1]　謝浩然[2]　宮田一乗[3]

概要：本論文では，プロシージャルモデリングによる階層的三次元ダンジョンの制作支援システムを提案する．提案システムには，パラメータ制御に加えて，デザイナーを支援する機能として，スケッチによるダンジョンの外郭形状の入力や，モデルの編集機能を実装し，デザイナーが直接手を加えることができるようにした．これらの機能により，デザイナーによるダンジョン制作の作業効率化を図った．また，ダンジョン生成において，到達のしにくさを表す新たな指標を導入した．ダンジョンのスタート地点から各行き止まりまでの到達しにくさを，河川次数を用いて計算した．この指標により，到達しにくい地点に，宝箱などのオブジェクトを配置する，というような実用的な使い方が可能になる．最後に，システムの有用性についての評価を行った．被験者には，実際にダンジョンを制作してもらい，その後アンケート調査を行った．また，制作したダンジョンをVR環境にて，探索できるようにし，スタート地点から各行き止まりまでの到達時間を測定することで，導入した到達のしにくさ，についての評価を行った．

1. はじめに

コンピュータゲームには，ローグやウィザードリィのようなダンジョン探索型のゲームがある．このようなダンジョン探索型のゲームのために，ダンジョンのプロシージャル生成に関する研究が数多く行われている．文献［1］では，ダンジョンのプロシージャル生成についての広範な調査が行われた．調査結果から，既存の研究の多くは二次元のダンジョンについてであり，三次元のダンジョンの自動生成に関する研究はあまり行われていない．そのため，三次元ダンジョンのプロシージャル生成について，さらなる研究が必要であると考える．

そこで本研究では，プロシージャルモデリングによる階層的三次元ダンジョンの制作支援システムを提案する．提案するシステムでは，プロシージャルモデリングと手作業による編集機能を組み合わせた手法をとっている．またスケッチによるダンジョンの外郭形状の入力も可能である．さらに，ダンジョンのスタート地点から行き止まりまでの到達のしにくさを導入することにより，到達のしにくさ，に応じたオブジェクトの配置を可能にした．

2. 関連研究

2.1 ダンジョン

関連研究として，ダンジョンの自動生成に関する研究がある．Evan[2]らは，特定のレベルをプレイするのが楽しくなるものを作成するために，デザイナーが設計したタイルベースのダンジョンを強化学習により学習して，新しいダンジョンを自動で生成するシステムを提案した．その結果，人間がデザインしたダンジョンに近づけることが示されている．また，ダンジョンのプロシージャル生成に関する研究の中で，生成されるダンジョンのモデルが三次元であるものをいくつか取り上げる．Roland ら[3]は，ゲームプレイ関連の設計制約をアクショングラフによって表現することにより，ゲームデザイナーがダンジョンの作成および制御をできるようにした．Roden ら[4]は，ダンジョン生成のために，三次元の無向グラフを作成し，作成したグラフの各頂点を実際のジオメトリに変換することで，三次元のダンジョンを生成している．Bartosz ら[5]は，迷路やダンジョンなど多種多様なレベルを半自動生成する新しいアプローチを提案している．ユーザは，グラフベースの抽象レベル構造を生成することで，対応するジオメトリが自動構築される．そして，実験結果により，提案されたアプローチが，複雑なレベルを効率的に作成し，レベルとゲームデザイナーの創造性の制限を最小限に抑えることを示している．

2.2 迷路

ダンジョンの自動生成に関連する研究として，迷路の研究がある．Jie ら[6]は，画像に基づいて迷路を生成する手法を提案した．この手法では，ユーザがソリューションパスを入力すると，そのパスに準拠する迷路が構築される．また，分割された領域ごとにスタイルパラメータを設定することで，迷路の外観を決めることが可能である．Hans ら[7]の研究では，有機的に見える迷路を自動生成するためのモデルを提案した．生成される迷路は，2D 多様体上の曲線として表される迷路であり，デザイナーはパスの複雑さと視覚的な美しさの
両方を制御できると示されている．Paul ら[8]の研究では，コンピュータゲームでの使用を想定し，デザイナーが希望のプロパティを入力して独自の迷路を作成できる，デザイン中心の迷路生成手法を提案した．この手法により，ゲームの仕組みに基づいた迷路の設計ができると示されてい

北陸先端科学技術大学院大学
Japan Advanced Institute of Science and Technology，　1-1 Asahidai，　Nomi，　Ishikawa 923–1292，　Japan

1) s1910044@jaist.acjp
2) xie@jaist.ac.jp
3) miyata@jaist.ac.jp

ⓒ2021 Information Processing Society of Japan

る．

本研究では，ダンジョンを制作するデザイナーを支援するために，従来手法より直感的な操作として，スケッチによる外郭形状の入力と編集機能を，実装している．

また，迷路の研究として，迷路の難易度についての研究がある．水澤ら[9]は，迷路問題の難易度指標として，障害物密度を提案した．この研究では，二次元正方格子状のグラフからなる迷路において，障害物密度に応じて，ランダムに障害物を配置することで，迷路を作成している．そして，生成される迷路の難易度のピークは，障害物密度が約41%のときであると示している．また，横田ら[10]は，人を対象にした迷路課題の難易度を定量的に決定するパラメータとして，ゴールまでのＴ字分岐の個数，および，迷路コストを提案している．実験結果から，どちらも同程度の難易度パラメータであることが示されている．Daryl ら[11]は，仮想迷路における人間のパフォーマンスにおいて，照明やランドマーク，オーディオキューなどが及ぼす影響についての調査を行った．

本研究では，ダンジョンの探索時におけるスタートから行き止まりまでの，到達しにくさを表す指標を提案する．この指標を導入することによって，到達しにくい行き止まりに宝箱などのオブジェクトを配置する，というような実用的な使い方が可能になる．

2.3 プロシージャルモデリング

プロシージャルモデリングの研究としては，地形や都市，建物，など多くの研究が行われている[12],[13],[14]．Ruben ら[15]の研究では，プロシージャル生成と手作業による編集をシームレスに統合して，仮想世界をモデリングするシステムを提案している．プロシージャルと手作業を組み合わせることによって，作業を効率化しつつ繊細な作業が可能になると示唆している．したがって本研究では，プロシージャルモデリングと手作業による編集を組み合わせた手法をとっている．

3. 提案手法

3.1 システム設計

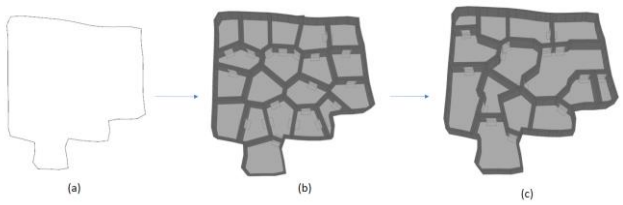

図 1：データプロセス：(a)入力,(b)入力からプロシージャル生成,(c)ユーザによる編集.

デザイナーは，図１のようにスケッチによりダンジョンの外郭形状を入力することで，ダンジョンを生成することができる．その後，パラメータや編集機能により，制御を行うことが可能である． これらのシステムは，プロシージャルモデリングが可能な DCC ツールである Houdini に実装した．

3.2 ダンジョン生成手法

外郭形状の入力と整形　本システムでは，ダンジョンの外郭形状をスケッチ入力する．次のステップである部屋の生成のために，外郭形状を多角形ポリゴンに変換する．多角形ポリゴンに変換するために，まず，入力のスケッチを整形(1 つの曲線に)する必要がある．近い距離にある点を結合し，均一の長さのセグメントでサンプリングし直すことで，入力の整形を行っている(図 3)．その後，サンプリングし直した点に基づいて一つのポリゴンを作成している．このような手順で，ダンジョンの外郭形状を生成するが，階層数が複数の場合は，階層ごとにスケッチを入力することになる．図 4 に，スケッチ入力された外郭形状の例を示す．

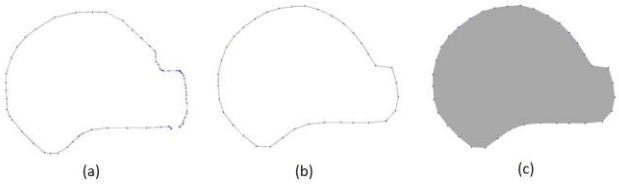

図 2：スケッチから多角形ポリゴンを生成する手順：(a)入力,(b)入力の整形,(c)多角形ポリゴン.

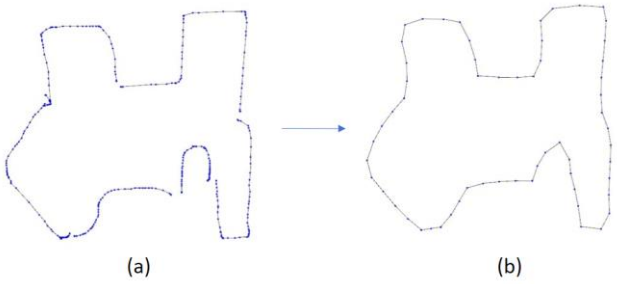

図 3：入力スケッチの整形：(a)入力,(b)整形された入力.

図 4：ダンジョンの外郭形状の例

部屋生成　次に，多角形ポリゴンをボロノイ分割することで，部屋の生成を行う．部屋は，図５のような手順で生成する．ボロノイ分割を使う理由としては，母点数によって簡単に部屋数の制御が可能となるためである．母点の配置では，領域内に母点を均一に配置することで，極端に小さい部屋が生成されないようにしている．そのために，まず適当に母点を配置した後，通常のボロノイ分割から(1)(2)を繰り返している．

(1) ボロノイ分割後，各領域の中心を求める．
(2) 母点を中心に移動して，もう一度ボロノイ分割する．

ⓒ2021 Information Processing Society of Japan

これを繰り返すことによって，均一に母点を配置することができる．例えば，ダンジョンの外郭形状が正方形のような場合は，図 6(a)のようになる．また，さらに母点の位置を手動で調整することで，図 6(b)のように異なる大きさの部屋を生成することも可能である．

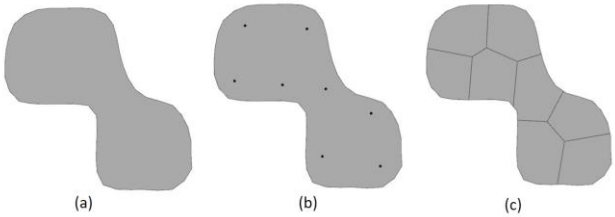

図 5：部屋の生成手順：(a)ポリゴン,(b)母点を配置,(c)ボロノイ分割.

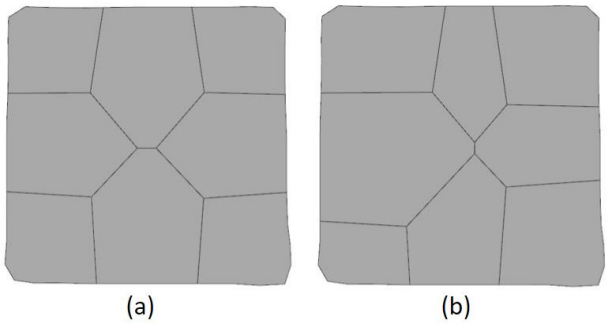

図 6：部屋の生成：(a)重心ボロノイ分割の結果,(b)大きさを調整した結果.

グラフ生成　部屋の生成後，生成した部屋に対応するグラフを，図 7 のような手順で生成する．まず，図 7(b)のように部屋の中心と部屋の出入り口・階段の配置場所となり得る位置に頂点を配置する．次に，配置した頂点を辺で接続する(c)．最後に，部屋の中心に位置する頂点を全域木でつなぐ（d)．全域木は，図 8 のような手順で生成している．

階層数が複数の場合は,階ごとにグラフを生成してから，階層間を繋げている．図 9 のような 3 階層の場合，A と B，C と E，D と F の部屋が重なっているため，それらの部屋を繋げる辺を追加している．生成したグラフから，同じように図 8 の手順で全域木が生成される．

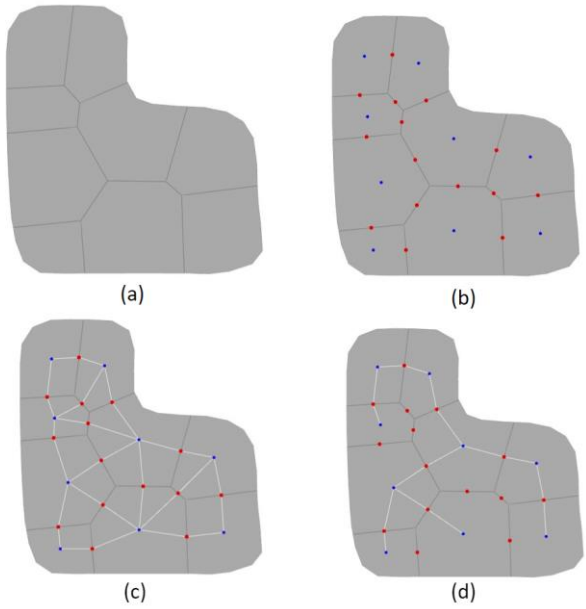

図 7：グラフ生成手順：(a)編集された部屋のレイアウト,(b)部屋の中心(青色の点)と境界の中点の位置(赤色の点)に点を配置,(c)接続,(d)部屋の中心の頂点を全域木でつなぐ.

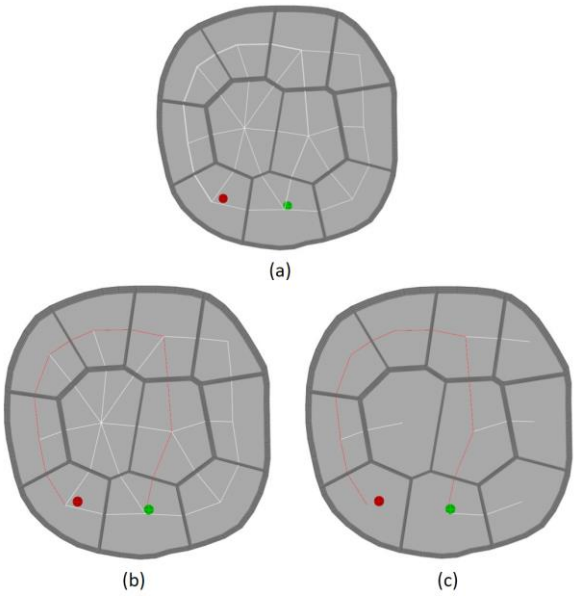

図 8：全域木生成手法：(a)スタートとゴールの設定,(b)解の生成,(c)辺の削除.

ⓒ2021 Information Processing Society of Japan

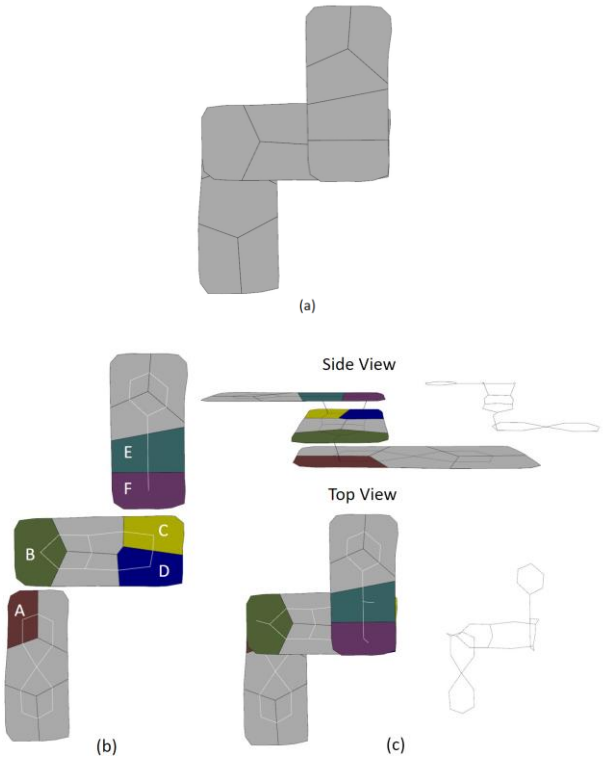

図 9：グラフ生成手順：(a)3 階層,(b)階ごとにグラフ生成,(c)辺を追加し重なっている部屋を繋げる．

壁の作成　次に，部屋とグラフから，プロシージャルモデリングによって，対応する 3D モデルを生成する．まず，生成した部屋のレイアウトから壁の押し出しを行う．壁に厚さを持たせるために，各部屋の内側方向に新たな面を作成する．そして，パラメータにより壁の高さを決定し，作成した面を上方向に押し出すことで壁を生成する(図 10)．押し出した壁と生成したグラフを使って，出入り口の部分に穴をあける(図 11)．

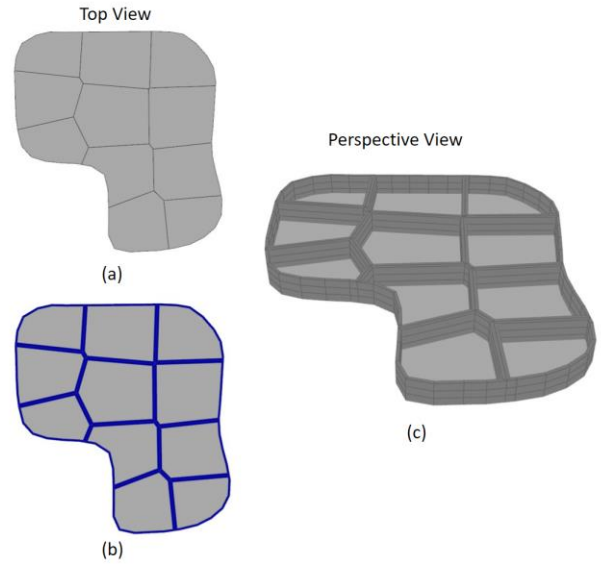

図 10：壁の作成手順：(a)部屋のレイアウト,(b)壁の作成(青色の領域),(c)壁を上方向に押し出した結果．

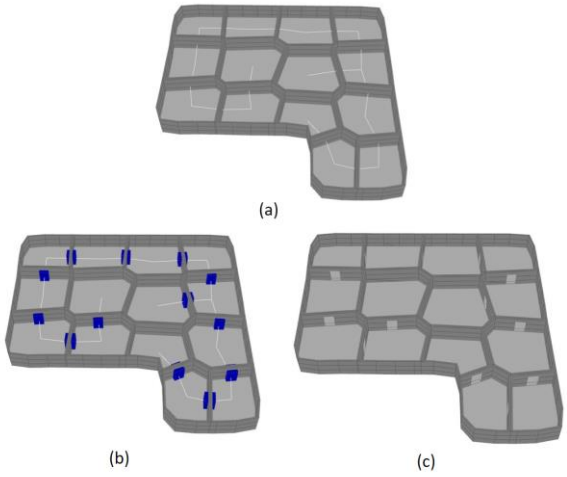

図 11：出入り口の作成：(a)押し出した壁と作成したグラフ,(b)交差点に Box 配置,(c)ブーリアン演算によって穴をあける．

階段の配置　階段を配置するときは，階ごとに部屋のレイアウトが異なるため，配置場所を考慮する必要がある．例えば，図 12 の(a)のような 2 つの部屋を繋げる階段を配置する場合，2 つの部屋の垂直方向での重なりを求め，重なっているセルの中心の位置に階段を配置する．また，階段の幾何モデルもプロシージャルモデリングによって作成しているため，階層間の高さに応じて階段の段数なども調整することも可能である．

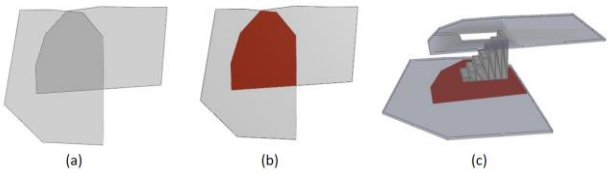

図 12：階段配置の例：(a)2 つの部屋,(b)部屋の垂直方向での重なりを求める(赤色の領域),(c)重なっているセルの中心に階段を配置．

オブジェクトの配置　グラフにより，ダンジョンを生成することで，グラフの葉の位置や分岐点などにオブジェクトを配置することができる．

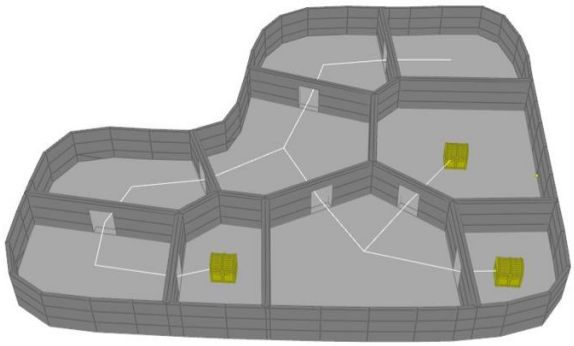

図 13：行き止まりに宝箱を配置した例

3.3 編集機能

部屋　本システムでは，部屋の生成をボロノイ分割によって行っている．そのため，ボロノイ分割時の入力である母点の位置を操作することによって，部屋の大きさや位置の調整が可能になる．図 14 が部屋の編集をしている例である．

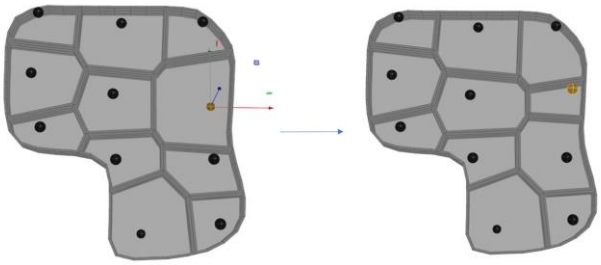

図 14：部屋を小さく編集した例

壁　上記の部屋の編集では，大まかな調整しかできないため，細かい調整として，壁の編集を提供する．壁の編集では，壁の移動・回転の 2 つの操作が可能である．図 15，16 が壁の編集をしている例である．壁の編集は，部屋生成後にエッジ(部屋の壁となる部分)抽出を行い，抽出したエッジに対して処理をすることによって実現している．また，図 17 に，壁の編集によって，対応するグラフが変化している例を示す．

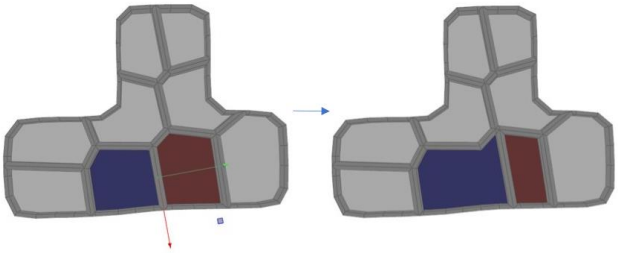

図 15：壁を移動させた例

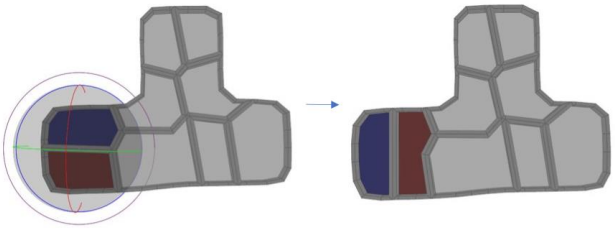

図 16：壁を回転させた例

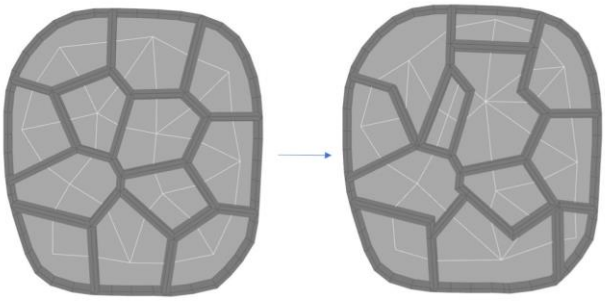

図 17：壁の編集によりグラフが変化した例

出入り口　ダンジョン内に配置される出入り口位置の編集も可能である．この編集操作は，壁に穴をあけるときに Box と壁とのブーリアン演算によって壁に穴をあけているが，その Box の位置を動かすことで実現している．

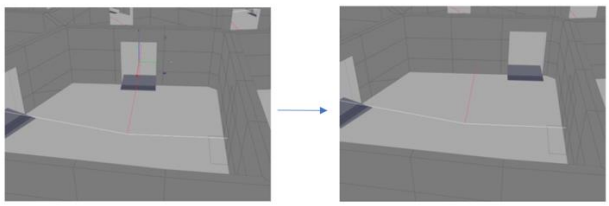

図 18：出入り口を移動させた例

スタートとゴール　ダンジョンを設計するとき，ダンジョンのスタートとゴールの位置も重要である．そこで，スタートとゴールの位置を編集できるようにし，スタートからゴールまでの解を見ながら,位置を決定することができる．図 19 がスタートとゴールの位置を編集している例である．

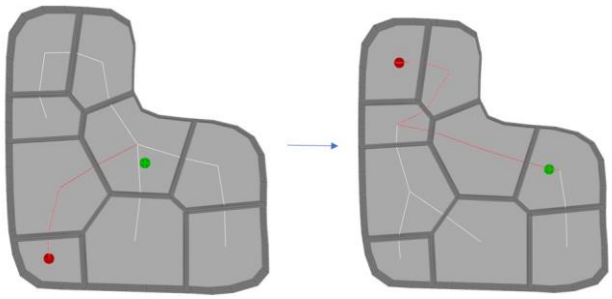

図 19：スタートとゴール位置を移動させた例．緑がスタート，赤がゴール．赤のパスが解で白のパスが分岐．

3.4 到達しにくさの提案

生成したダンジョンのスタートから行き止まりまでの到達のしにくさを，河川の順位付けの手法である Shreve[16]の手法により計算した．計算は，図 20 のような手順で行った．まず，全ての行き止まりに 1 次を割り当てる.次に分岐点の次数を計算する.分岐点の次数の計算は，例えば，1 次の行き止まり 3 つに接続している場合，その分岐点には 3 次が割り当てられ，3 次の分岐点と 1 次の行き止まりに接続している分岐点の場合には，4 次が割り当てられる(図 20(a))．そして，スタートから行き止まりまでの次数を加算していき，行き止まりまでの到達のしにくさが計算される(図 20(b))．このように行き止まりまでの

到達のしにくさを計算することで，ゴールの設定や宝箱などのアイテムの配置などに生かすことができる．具体的には，到達のしにくい行き止まりには，良いアイテムを配置しておく，などが可能になる．

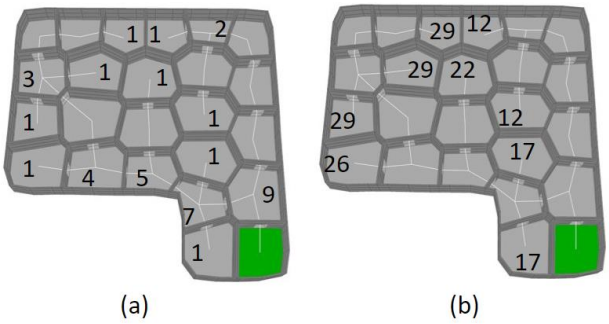

図 20：到達しにくさの計算手順：(a)行き止まりと分岐に次数を割り当てる,(b)行き止まりの到達しにくさを計算．

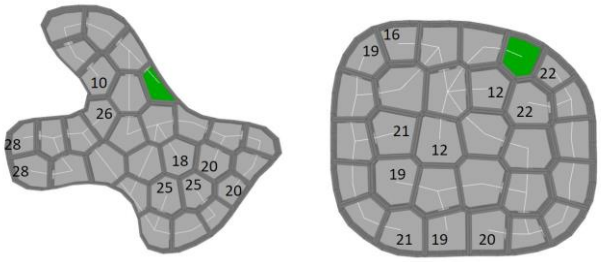

図 21：到達しにくさの計算結果の例

4. 実験と評価

システムの有用性についての評価実験を，大学院生 9 名に対して行った．被験者には実際にシステムを使ってダンジョンを制作してもらった．その後，システムの使いやすさについてのアンケート調査を行った．アンケートの結果を図 22 に示す．

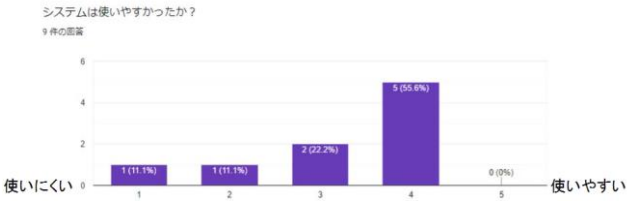

図 22：使いやすさについての実験結果

アンケート結果から，9 名中 2 名が使いにくいと答えていることがわかる．理由として，本システムは Houdini 上で動作するものであるが，インターフェースなどがまだ分かりやすく実装できず，どのような機能が使えるか分かりにくい,ということがあったためと考えられる.そのため，ユーザインターフェースに関しては，改善する必要があるということが分かった．

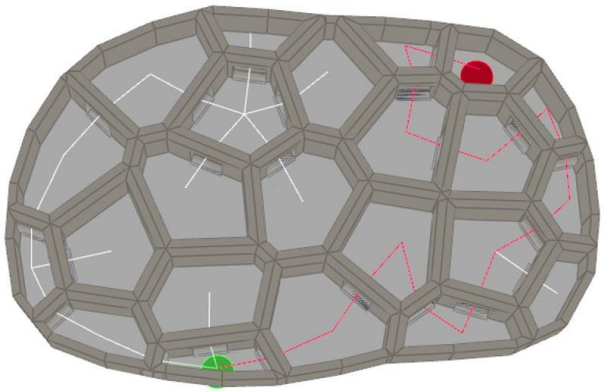

図 23：被験者が制作したダンジョン

また，到達しにくさを表す指標についての評価実験を，大学院生 6 名に対して行った.評価実験のために,HTC Vive 及び SteamVR を用いて VR 環境を構築し，被験者に図 24 のダンジョンを探索してもらった．実験では，全ての部屋に到達することを「探索完了」と定義し，被験者には探索完了するまで続けてもらった．そして，スタートから行き止まりの部屋までの到達時間を測定した実験結果を図 25 に示す．各地点の平均の到達時間を見ると，A→B，C→D，E の順で平均の到達時間が大きくなっていることが分かる．実験結果より，到達しにくさの有効性を確認することができた．

最後に，本システムにより制作したダンジョンの例を図 26,27,28 に示す．このように，複数階層のダンジョンを制作することが可能である．

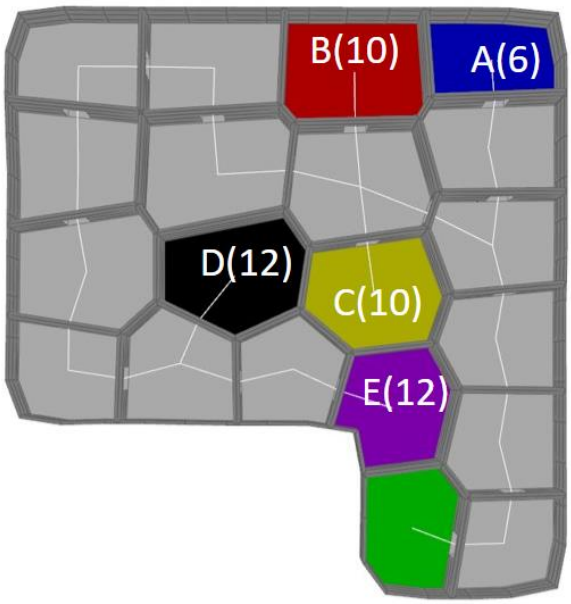

図 24：実験で使用したダンジョン．緑の部屋がスタートで，色のついた部屋までの到達時間を測定した．数値は到達しにくさを表す．

ⓒ2021 Information Processing Society of Japan

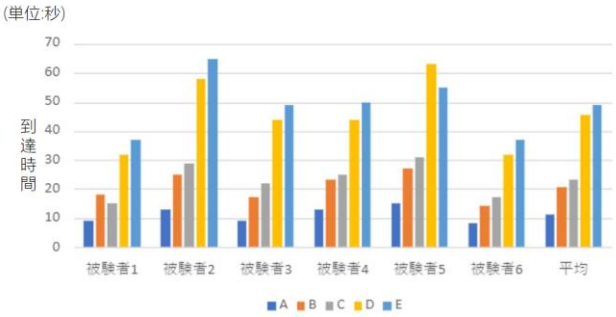

図 25：到達しにくさ，についての実験結果

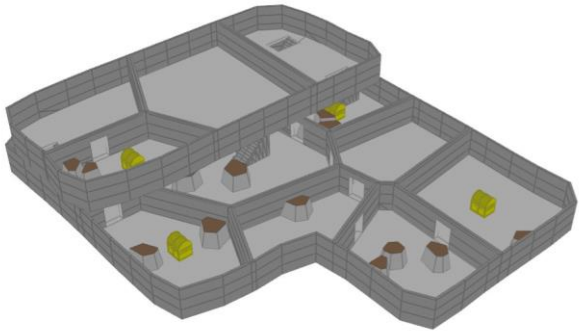

図 26：本システムにより制作したダンジョンの例(1)．2 階層

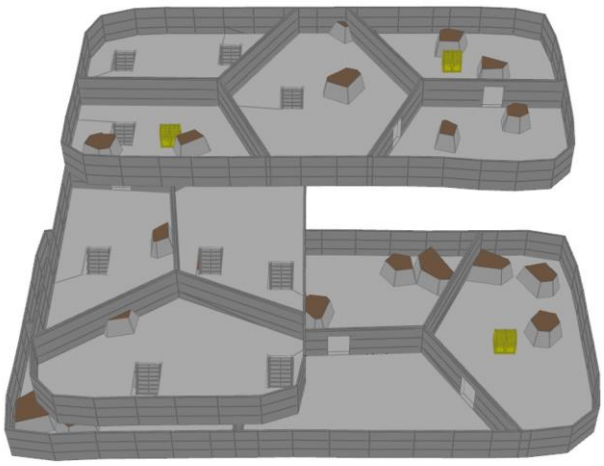

図 27：本システムにより制作したダンジョンの例(2)．3 階層

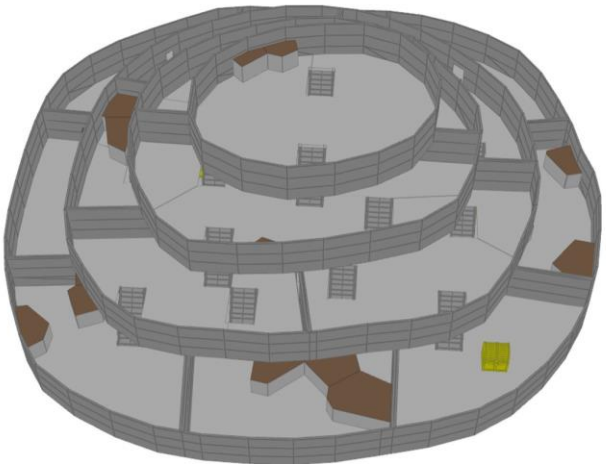

図 28：本システムにより制作したダンジョンの例(3)．4 階層

5. おわりに

本論文では，プロシージャルモデリングによる階層的三次元ダンジョンの制作支援システムを提案した．パラメータによる制御に加えて，デザイナーを支援する機能として，ダンジョンの外郭形状のスケッチインターフェースおよびインタラクティブな編集機能を実装した．このように，プロシージャル生成と編集機能を組み合わせることで，ダンジョン制作の作業効率化とともに，デザイナーの意図を組み込むことで，特色のあるダンジョンを制作することができるようになると考える．また，スタートから行き止まりまでの到達しにくさを表す指標を提案した．この指標により，オブジェクトの配置などに役立てることができると考える．

参考文献

[1] R. v. d. Linden, R. Lopes , R. Bidarra, “Procedural Generation of Dungeons，” IEEE TRANSACTIONS ON COMPUTATIONAL INTELLIGENCE AND AI IN GAMES, VOL. 6, NO. 1, 2014.
[2] E. C. Sheffield , M. D. Shah, “Dungeon Digger: Apprenticeship Learning for Procedural Dungeon Building Agents,” CHI PLAY'18 Extended Abstracts, 2018.
[3] R. v. d. Linden, R. Lopes , R. Bidarra, “Designing Procedurally Generated Levels,” Artificial Intelligence in the Game Design Process 2: Papers from the 2013 AIIDE Workshop, 2013.
[4] T. Roden , I. Parberry, “From Artistry to Automation: A Structured Methodology for Procedural Content Creation,” Entertainment Computing - ICEC 2004, Third International Conference, Eindhoven, The Netherlands, 2004.
[5] B. v. R. Lipinski, S. Seibt, J. Roth , D. Abé, “Level Graph – Incremental Procedural Generation of Indoor Levels using Minimum Spanning Trees,” IEEE Conference on Games, 2019.

ⓒ2021 Information Processing Society of Japan

[6] J. Xu , C. S. Kaplan, “Image-Guided Maze Construction,” ACM Transactions on Graphics, 2007.
[7] H. Pedersen , K. Singh, “Organic labyrinths and mazes,” Proc. of the 4th international symposium on Non-photorealistic animation and rendering, 2006.
[8] P. H. Kim, J. Grove, S. Wurster , R. Crawfis, “Design-Centric Maze Generation,” PCG Workshop, 2019.
[9] 水澤 雅高 , 栗原 正仁, “迷路問題における難易度指標の導入と実時間探索アルゴリズムの性能解析,” The 20th Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence, 2006.
[10] 横田 和幸, 船瀬 新王, 藤原 清悦 , 内匠 逸, “ヒトを対象にした迷路課題の難易度を定量的に決定するパラメータの検討,” 生体医工学, 2019.
[11] D. Marples, D. Gledhill , P. Carter, “The Effect of Lighting, Landmarks and Auditory Cues on Human Performance in Navigating a Virtual Maze,” Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, 2020.
[12] Y. I. H. Parish , P. Müller, “Procedural Modeling of Cities,” Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 2001.
[13] P. Muller, P. Wonka, S. Haegler, A. Ulmer , L. V. Gool, “Procedural Modeling of Buildings,” ACM Transactions on Graphics, 2006.
[14] J. -D. Genevaux, E. Galin, E. Guerin, A. Peytavie , B. Benes, “Terrain Generation Using Procedural Models Based on Hydrology,” ACM Transactions on Graphics, 2013.
[15] R. Smelik, T. Tutenel, K. J. d. Kraker , R. Bidarra, “Integrating procedural generation and manual editing,” Proceedings of the 2010 Workshop on Procedural Content Generation in Games, 2010.
[16] Shreve，R. L.(1966):Statisticallaw ofstream numbers，Jour. Geo1.，74，17-37.

ⓒ2021 Information Processing Society of Japan