

令和 2 年 6 月 21 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K18214

研究課題名（和文）効率的な緑視率の確保を目的とした植栽計画の目安となる設計指標の作成

研究課題名（英文）Creation of design index as a guide for planting plan considering green visibility

研究代表者

藤井 健史 (Fujii, Takeshi)

立命館大学・理工学部・助教

研究者番号：50599199

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、どのような形状の樹木をどのような条件で配置すればどの程度の緑視率（＝緑の可視量）を得られるのかを明らかにし、より少ない設計労力で精度よく緑視率の確保を加味した植栽計画を策定できるよう、その助けとなる設計指標の作成を検討したものである。GPUを援用した高速緑視率計算手法を開発し、50m四方の仮想敷地にランダム生成した大量の樹木配置モデルの緑視率計算を行った。これにより、樹木の形状・配置数・配置形態に応じた緑視率の統計的な期待値を明示するとともに、樹木の配置条件と緑視率の分布様態との関係を分析した。得られた知見は、緑視率確保を加味した樹木配置計画を行う際に、検討の目安になると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

外部空間において、利用者からどれだけ緑が見えているのかは、快適性の向上の観点から計画上の重要なテーマとなる。しばしば緑視率といった指標で評価され、効率的な緑視率の確保が計画に求められる。しかし、植栽計画は計画者の感覚に頼る部分が大きく、緑視率の確保が精度よく検討されているとは言いがたい。本研究で得られた知見は、植栽計画を行う上でどの程度の緑視率が確保されるかを示す目安となりうるものであり、緑視率を加味した計画検討の効率化や精度向上への貢献が期待できる。緑地の計画は前述のように快適性の向上という公共の利益に関わるものであることから、本研究の社会的意義が認められる。

研究成果の概要（英文）：This study clarified the effect of tree shape and placement conditions on green visibility, and examined the creation of design indexes to help planting plans to obtain green visibility accurately with less design effort. We developed a high-speed green visibility calculation method using a GPU and calculated green visibility of a large number of tree placement models randomly generated on a virtual site of 50 meters square. From these results, the statistical expected value of green visibility according to the shape of trees, the number of arrangements, and the arrangement form was clarified. In addition, we analyzed the relationship between the arrangement condition of trees and the distribution of green visibility. The obtained knowledge is considered to be a reference for examination when planning the arrangement of trees in consideration of green visibility.

研究分野：空間解析

キーワード：緑視率 全方位視野 GPGPU 立体角 交差判定 植栽計画支援 可視領域

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

緑視率は緑の可視性の指標としてはしばしば用いられ、近年では、例えば「第1次京のみどり推進プラン」のように行政によってその目標値が定められた例もある。従来の緑被率のような平面的な緑地面積で規定される緑化指針のみならず、人の目線に立った立体的な緑の可視性を確保することが、今後の緑地環境整備において重要なテーマとなることを示している。

しかし、緑被率とは異なり、緑視率は観測者と緑地の3次元的な幾何学的関係によって決まる数値であるため、計画の段階でどの程度の緑視率を確保できるのかを算定するには技術的な専門性や大きな労力を要する。よって、現状では計画者の感覚的判断に頼る場合が多く、効率的な緑視率確保の検討が精度よく行われているとは言い難い。仮に、ある形状の樹木をある本数配置した場合にどの程度の緑視率の値になるのかという数値上の目安を示すことができれば、緑視率確保を加味した植栽計画をより少ない設計労力で精度よく策定できるようになる。しかし、そのような検討を定量的に行った研究成果はこれまでに報告されていない。

2. 研究の目的

前述を踏まえ、本研究はどのような形状の樹木をどのような条件で配置すればどの程度の緑視率の値になるのか、すなわち樹木配置と緑視率の数理的な関係を解明し、緑視率確保を加味した植栽計画の策定を補助するための指標や算定手法を提示することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 全方位緑視率計算プログラムの開発

① 計算手法概要と GPU を用いた計算アルゴリズムの設計

本研究では視点から放射した走査線と樹木の3次元モデルとの交差の有無を総当たりで判定し、これに基づき近似的に立体角を算出する。図1に立体角計算の概念図を示す。ここで、視点から放射する走査線総数を  $N$ 、視対象に交差する走査線数を  $N_i$  とすると、視対象  $S$  の単位球面上の立体角  $S'$  は次式で表される。

$$S' \approx 4\pi (N_i / N) \tag{1}$$

さらに、視対象が全方位視野に占める割合を全方位可視率  $V$  とすると、全方位可視率  $V$  は単位球表面積に対する視対象の立体角  $S'$  の割合であり、式(1)より視対象に交差する走査線数  $N_i$  を走査線総数  $N$  で除して近似的に求められる。

$$V = S' / 4\pi \approx N_i / N \tag{2}$$

樹木モデルは3次元 CAD を用いて三角形ポリゴンのメッシュモデルとして作成し、各ポリゴンの頂点座標をデータセットとして出力し交差判定に用いる。視点は高さ 1.5m とし、正二十面体の各面を細分化して得られる立体格子を基準とした 10,242 本の走査線を全方位に放射し、Möller-Trumbore intersection algorithm によってポリゴンとの交差判定を行う。

ここで、本研究は4章に示すように大量の樹木配置モデルをサンプルに緑視率の計算を行い、その結果を統計的に分析することで樹木配置と緑視率の数理的な関係を明らかにしようというアプローチを取っている。しかし、従来の CPU ベースの並列計算アルゴリズムでは本研究が想定する緑視率の総計算時間が研究遂行上の現実的な時間内に収まらず、実質的に研究のボトルネックとなっていた。そこで、各走査線と樹木モデルの各ポリゴンとの交差を総当たりで判定するにあたり、走査線ごとの処理を GPU のコアに分配し、並列処理を実装する設計とすることで、計算の高速化を図った。図2にアルゴリズムのフローチャート

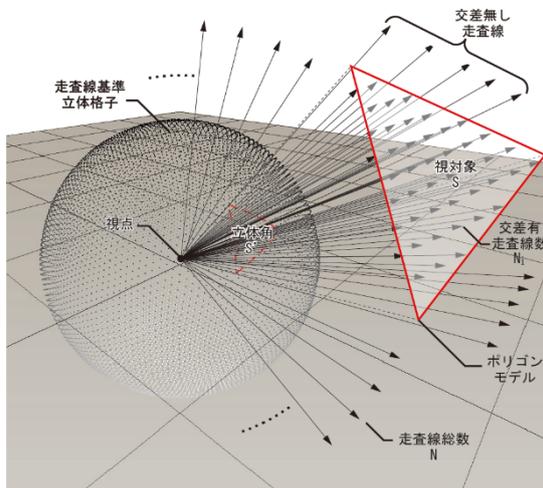


図1 交差判定による立体角の計算

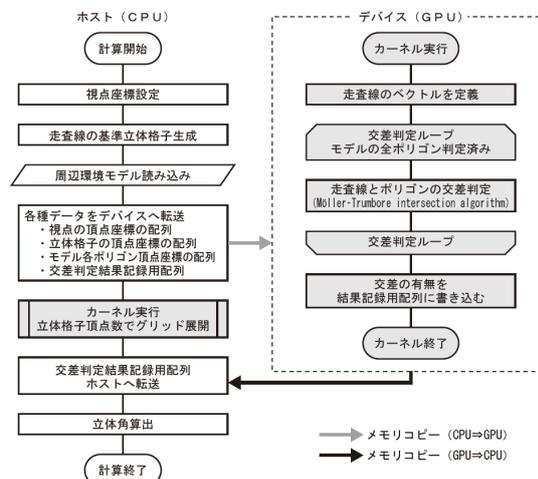


図2 GPU を用いた立体角計算プログラムのフローチャート

ャートを示す。プログラムの開発は汎用プログラミング言語である Python で行った。GPU の制御には GPU 向けの汎用並列コンピューティングプラットフォームとして NVIDIA が開発・提供している CUDA を使い、コンパイルはカーネル関数やデバイス関数のコンパイルもサポートする Python 向け実行時コンパイラの Numba によって行う。

## ② GPGPU による計算の高速化の効果検証

GPU による計算能力の向上を確認するため、全方位緑視率の計算の交差判定の並列処理を CPU で行った場合 (Case\_CPU) と GPU で行った場合 (Case\_GPU) のそれぞれについて速度計測を行った。本研究で用いた CPU と GPU の仕様を表 1 に示す。いずれもゲーミング PC など で用いられる一般的な価格帯のプロセッサである。

使用するモデルは 50m×50m の敷地に同形状の樹木 100 本を樹冠が重ならないようにランダムに配置して作成した。敷地規模は住区基幹公園の街区公園に相当する規模である。樹木は樹冠形状を球体として、ポリゴンメッシュで簡略化した表現としている (図 3)。モデル全体のポリゴン総数は 8000 ポリゴンである。敷地には 2m 間隔で観測点を設定し、625 地点で走査線 10,242 本による全方位緑視率の計算を行う。処理全体で実行する交差判定の総数は約 500 億回 (625 地点×走査線 10,242 本×8,000 ポリゴン) となる。CPU と GPU それぞれのコア数に応じて、Case\_CPU は 6 スレッド、Case\_GPU は 3584 スレッドの並列アルゴリズムを組み計算した。なお、本研究における全方位緑視率  $G_v$  は式 (2) より、樹木モデルと交差する走査線数  $N_i$  を走査線総数  $N$  (ここでは  $N=10,242$ ) で除して近似的に求める。

計測結果を表 2 に示す。Case\_CPU は 4 時間強の時間を要したのに対し、Case\_GPU では約 30 秒で計算が完了した。計算時間にして約 500 倍の高速化が確認できた。一般的に GPGPU は CPU での計算よりもオーバーヘッドが嵩むため、一定以上の計算量でなければ結果的に計算速度の向上を見込めない場合もある。結果より、検証に用いた程度の計算量であれば十分に GPU の性能を引き出せていると言える。

## 4. 研究成果

### (1) ランダム樹木配置モデルの生成

前章で GPU の全方位緑視率計算への応用の有効性を確認できた。本章では、樹木の形状や本数を変化させて作成した多数のランダム樹木配置モデルに対して緑視率の計算を行い、統計的な考察を加える。ランダム樹木配置モデルの作成に用いた 12 種類の樹木モデルの断面形状を図 4 に示す。具体的な樹木形状の設定手順としては、まず樹木 A を基準に樹冠高  $h$  を 3.6m に固定しながら樹冠の高さと幅の比率 ( $h/w$ ) を 1.0、1.5、2.0 の 3 段階に変化させ、樹木 A、B、C の 3 パターンの断面形状を得る (図 4 最左列)。次に、これら 3 パターンの樹木を 1.5 倍、2.0 倍、2.5 倍の倍率で相似な立体として拡大し、全部で 12 種類の樹木形状を作成する<sup>注1),2)</sup>。次に、各樹木について 50m×50m の敷地に対して緑被率が約 20% となる本数を決めランダムに配置する。これにより、大きな樹冠幅のものが少数配置されるモデルや細長い形状のものが多数配置されるモデルなど、同じ緑被率でも樹木の形状と配置数が異なる樹木配置モデルを作成することができる<sup>注3)</sup>。さらに、統計的な一般性を担保するため、12 種類の樹木ごとに 300 通りのランダム樹木配置モデルを生成し、計 3,600 のモデルに対して立体角計算プログラムを実行し緑視率の計算を行う。視点の高さ、走査線数、観測点数は 3 章と同様である。

表1 演算ユニット仕様

	CPU (Intel Core i7-7800X)	GPU (NVIDIA GeForce GTX 1080 Ti)
クロック数	3.50 GHz	1.48 GHz
コア数	6	3,584
単精度浮動小数点数演算性能	1.344 TFLOPS	10.61 TFLOPS

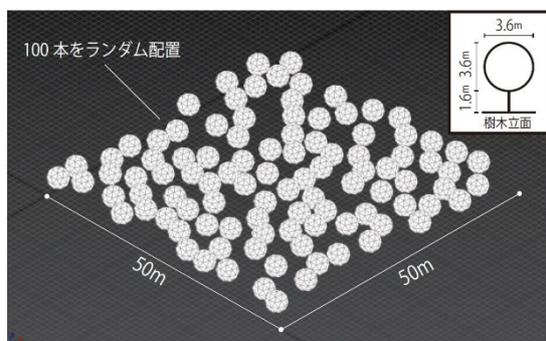


図3 速度計測使用モデル

表2 速度計測結果

	CPU (Intel Core i7-7800X)	GPU (NVIDIA GeForce GTX 1080 Ti)
計算所要時間	15053.23sec	30.65sec
CPU 比高速化率	—	491.1

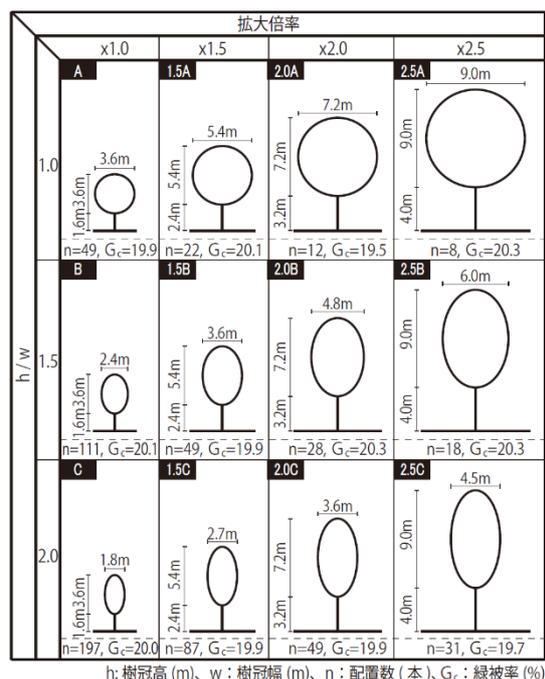


図4 検討に用いた樹木モデル12種類

## (2) 全方位緑視率の計算結果と考察

図5に樹木配置モデル毎の緑視率のヒストグラムを示す。横軸は緑視率(%)であり、それぞれ300通りのランダム樹木配置モデルの計算によって得られた計187,500観測点分(625観測点×300通り)の緑視率のヒストグラムである。ヒストグラムは概ね正規分布に従っている。表3と図6に12種類の樹木形状別のランダム樹木配置モデルの緑視率期待値E[Gv]と標準偏差SDを示す。ここで、E[Gv]およびSDは各モデルの平均緑視率の期待値および標準偏差である。

表3、図6より、E[Gv]±2SDのレンジは最もばらつきのあったModel(2.5A, 8)でも1.62%に収まっており、各モデルのE[Gv]の信頼性が高いことを示している。この信頼性は、各樹木形状について300モデルずつ計3,600モデルの大量のシミュレーションを行った結果得られたものである。GPGPUの導入によって、3,600モデルの処理時間は計26時間に収まっている。仮にCPU単体でこれだけの処理を行うには、3章の速度比較の結果から概算するとおよそ1年半かかることになる。各モデルのE[Gv]を見ると、E[Gv]が最大であったのはModel(C, 197)で24.97%となった。一方で、最小のE[Gv]となったのはModel(2.5A, 8)の10.33%であり、Model(C, 197)の4割程度の値となった。同じ緑被率でも樹木の形状や配置数によって緑視率に大きな差が出る。Model(A, 49)、Model(1.5B, 49)、Model(2.0C, 49)は樹木の形状は違うがE[Gv]はほぼ同等になることがわかる。これらは樹木配置数nが等しいため、樹冠の立面面積に応じてModel(A, 49)のE[Gv]は小さく、Model(2.0C, 49)のE[Gv]は高くなるように思われる。ただし、立体角は視対象までの距離が離れるほど小さく計算される。地面から樹冠最下部までの高さはModel(A, 49)では低く、Model(2.0C, 49)では高いため、これらのモデルでは立面面積の増加による緑視率の増加と視距離増加による緑視率の減少が均衡して同程度のE[Gv]となったと考えられる。一方で、図6を見ると緑視率のヒストグラムには3つのモデル間の違いがみられる。Model(A, 49)は低いGvでピークを取るもののGv≥30%の高い値の観測点もある程度存在し、右に歪んだ広がりのあるなだらかな分布となっている。一方、Model(2.0C, 49)は高いGvでピークを取るものの広がり的小さな尖った分布となってGv≥30%となる観測点はほとんどない。Model(1.5B, 49)はModel(A, 49)とModel(2.0C, 49)の間のような分布形態となっているが、どちらかと言えばModel(2.0C, 49)に近い。他には、Model(2.0B, 28)とModel(2.5C, 31)の

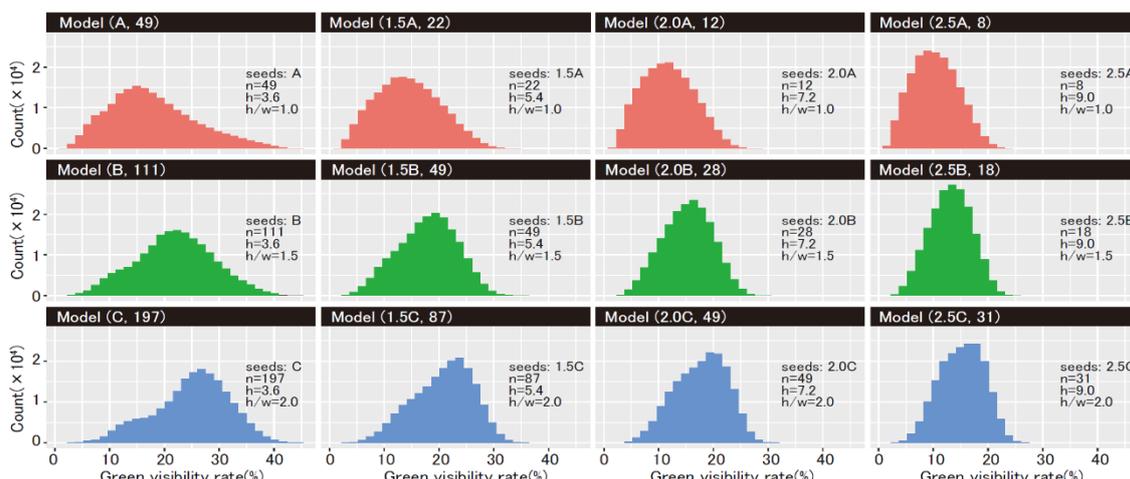


図5 各樹木配置モデルの緑視率のヒストグラム

表3 各樹木配置モデルの緑視率の期待値と標準偏差

	Model (A, 49)	Model (1.5A, 22)	Model (2.0A, 12)	Model (2.5A, 8)	Model (B, 111)	Model (1.5B, 49)	Model (2.0B, 28)	Model (2.5B, 18)	Model (C, 197)	Model (1.5C, 87)	Model (2.0C, 49)	Model (2.5C, 31)
E[Gv](%)	17.85	14.43	11.72	10.33	21.90	17.84	15.23	13.14	24.97	20.68	17.66	15.15
SD(%)	0.13	0.24	0.32	0.41	0.10	0.16	0.21	0.24	0.10	0.12	0.16	0.19
E[Gv]±2SD(%)	17.60 ~18.10	13.96 ~14.90	11.08 ~12.35	9.52 ~11.14	21.70 ~22.10	17.52 ~18.15	14.80 ~15.65	12.66 ~13.61	24.77 ~25.16	20.45 ~20.91	17.35 ~17.97	14.76 ~15.53

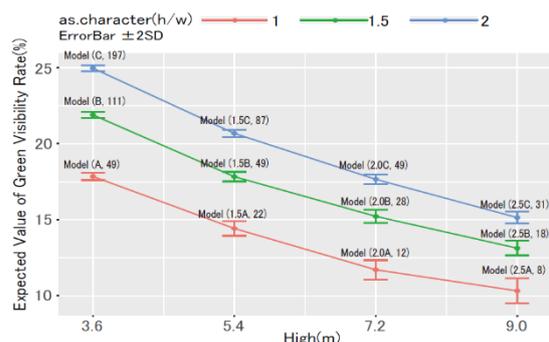


図6 各樹木配置モデルの緑視率の期待値

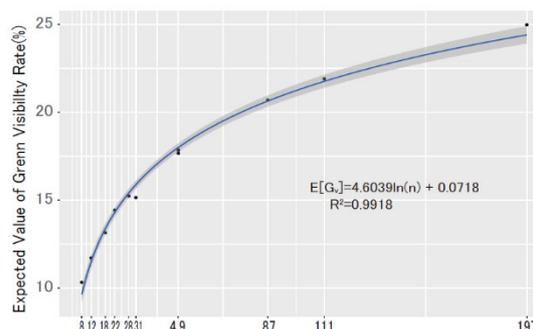


図7 樹木配置数Nと緑視率期待値の散布図

E[Gv]も近い値となっている。

ここで改めて全体結果を概観する。表3、図6よりE[Gv]は樹冠幅が大きい樹木を少数配置するよりも樹冠幅の小さい樹木を多数配置する方が緑視率期待値E[Gv]は高くなる傾向が見られた。そこで、樹木配置数nを横軸とした緑視率期待値E[Gv]の散布図(図7)を作成した。結果、対数近似による以下の回帰式を得た。

$$E[Gv] = 4.60391\ln(n) + 0.0718. \quad (3)$$

式(3)の決定係数は $R^2=0.9918$ となり、非常に当てはまりのよい回帰式が得られた。あくまで本研究で設定した12種類の形状の樹木を緑被率が約20%になるように50m四方の敷地にランダム配置した場合に限定されるが、全方位緑視率の期待値E[Gv]は配置される樹木の断面形状に関わらず、樹木配置数nを変数とした式(1)に従うことが明らかとなった。

図5より、緑視率のヒストグラムは樹木形状の拡大倍率が高くなるにつれて尖度の高い分布形態を示す傾向にある。これは、前述のModel(A, 49)、Model(1.5B, 49)、Model(2.0C, 49)のヒストグラムにも当てはまるが、3モデルの樹冠幅wと配置数nは等しいためこれらが尖度の主要な決定要因とは考えにくい。よって、ヒストグラムの尖度は樹冠幅wや配置数nよりも樹冠高hや地面から樹冠最下部までの高さに関係していると考えられる。すなわち、地面から低い位置に樹冠高の低い樹木を配置する方が敷地内の緑視率の分布は多様となる。反対に地面から高い位置に樹冠高の高い樹木を配置すると敷地内は比較的一様な緑視率の分布となる。例えば公園の植栽計画を行う際、その公園内の緑視率環境を多様なものにしたければ、地面から低い位置に樹冠高の低い樹木を配置した方がよい。反対に、公園内を一様な緑視率環境として計画したい場合は、地面から高い位置に樹冠高の高い樹木を配置した方がよい。

### (3) まとめと展望

本研究ではGPGPUを用いて交差判定を並列化し、全方位緑視率を高速計算する手法を開発した。本研究で用いた検証モデルによると、CPU単体での処理と比較しておよそ500倍の高速化が確認できた。さらに、開発した手法をランダム樹木配置モデルの全方位緑視率の計算に応用した。GPGPUによって計算の高速化が実現したことで計3,600のサンプルモデルによる十分な試行回数を確保することができた。これにより、本研究で取り扱った条件の範囲においては、統計的な一般性を確保しつつ全方位緑視率の期待値や分布形態について樹木形状およびその配置数との間の数理的な関係性を分析・考察することができた。得られた知見は、緑視率確保を加味した樹木配置計画を行う際に、検討の目安となる知見であると考えられる。主な知見を以下に示す。

- ① 本研究で扱った12種類の樹木形状について、それらを50m四方の敷地にランダムに配置した場合の全方位緑視率の期待値をそれぞれ明示した。
- ② 12種類の樹木形状による各300モデルの平均緑視率の標準偏差はいずれも小さく、全方位緑視率の期待値は高い信頼性を担保できている。
- ③ 全方位緑視率の期待値は、配置される樹木の断面形状に関わらず樹木配置数を変数とした対数近似の回帰式に非常に当てはまりよく回帰することを明らかにした。
- ④ 12種類のランダム樹木配置モデルの緑視率のヒストグラムを示した。緑視率の分布は樹冠高hや地面から樹冠最下部までの高さが低いほど多様に、高いほど均一になる。

一方で、得られた知見は本研究での計算条件における限定的な結果に基づくものである。今後、樹木の形状や配置数、敷地形状等を変更してさらに多くのシミュレーションと分析を重ね、より広範な条件下での結果について検討する必要がある。最終的には得られた結果を体系的にまとめ、緑視率確保を加味した樹木配置計画の検討に対してより汎用性の高い資料としたい。

### 注釈

注1) 樹冠のサイズやh/wは一般的な範囲に収まるよう配慮しつつ、緑被率20%に近い値となる本数を定められるように調整し決定した。また、3パターンの樹木形状を拡大する際には、樹冠部分のみでなく地面から樹冠最下部までの高さも含めて拡大している。

注2) 記述の簡便さのために樹木形状について記号を定める。樹木Aを1.5倍、2.0倍、2.5倍にした樹木モデルを“1.5A、2.0A、2.5A”とする。樹木B、Cについても同様である。

注3) 記述の簡便さのために、各樹木配置モデルについては樹木形状記号と樹木配置数nを用いて“Model(樹木形状記号, n)”と表記する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 藤井健史, 山田悟史	4. 巻 1
2. 論文標題 樹木の形状と配置が緑視率に与える影響に関する基礎的考察とランダム配置シミュレーションの試行	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 第40回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 pp.221-224
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 山田悟史, 藤井健史, 宗本晋作	4. 巻 第81巻, 第727号
2. 論文標題 全方位緑視率を用いた緑地環境に対する印象評価推定モデル作成と検証 - 全方位緑視率と印象評価実験をもとにした自己組織化マップを用いて -	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 日本建築学会計画系論文集	6. 最初と最後の頁 pp.2083-2093
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 藤井健史, 山田悟史	4. 巻 第26巻, 第63号
2. 論文標題 GPGPUを用いた交差判定式全方位可視率計算の超高速化-緑視率計算と植栽計画指標検討への応用-	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会技術報告集	6. 最初と最後の頁 pp.802-807
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 藤井健史, 藤居英美佳	4. 巻 13
2. 論文標題 丸亀城の天守および石垣の見え方に関する定量的分析: 景観的被害を加味した文化財防災の検討に向けて	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 歴史都市防災論文集	6. 最初と最後の頁 pp.139-146
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.34382/00009385	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 藤井健史, 山田悟史	4. 巻 2018
2. 論文標題 ランダム配置シミュレーションによる樹木配置数と緑視率の数理的關係に関する考察	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 pp.113-116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 藤井健史	4. 巻 2019
2. 論文標題 丸亀城周辺街路における天守および石垣の見え方に関する定量的考察	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 pp.89-92
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 藤井健史, 東山昂平	4. 巻 1
2. 論文標題 駅から街に出る際のシークエンス景観における景観構成要素の可視率と開放度に関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第42回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 pp.298-301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 藤井健史
2. 発表標題 特定の景観要素に着目した可視量分析から得る計画の手がかり
3. 学会等名 第82回 日本建築学会空間研究小委員会研究会 「日本におけるスペースシンタクス研究の広がり可能性」 (招待講演)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----