

航空機LiDARを用いた 囲繞度の推定手法の開発

小宮佑登¹・須崎純一²・上田ゆかり³

¹学生会員 京都大学大学院工学研究科 (〒615-8530 京都府京都市西京区京都大学桂)

E-mail: komiya.yuuto.66s@st.kyoto-u.ac.jp

²正会員 准教授 京都大学大学院工学研究科

³非会員 関西大倉高等学校

都市の景観を管理する上では景観の統一性・連続性が重要であるが、これらを分析するには広範囲における景観の把握が必要である。航空機LiDAR (Light Detection and Ranging)は、広範囲の3次元の座標を高速に取得することができる。本研究では航空機LiDARで計測したDSM(Digital Surface Model), DTM(Digital Terrain Model)のデータを用いて、広範囲における任意の地点での囲繞度を推定する手法を提案する。囲繞度は、視野の立体角に対する地物の立体角の占める割合として定義した。京都市東山区を対象に提案手法を適用した結果、やや過小評価気味ではあったが、囲繞度を誤差約3%で推定することができた。

Key Words : *the enclosure index, airborne LiDAR, DSM, DTM*

1. 背景と目的

2004年に日本初の景観に関する総合的な法律である景観法が施行されたことで、公的な領域のみでなく門や塀、建物までのアプローチなどの境界領域を含めた景観整備を進めるための基盤が整った。実際に、道路における緑量や圧迫感を規定する自治体が現れてきている¹⁾。道路景観において重要なのは、景観の連続性や統一性であるとされ、そのためには広範囲を対象とした景観の管理が求められる。

数十 cm から 1 m 程度の詳細な解像度を保ちながら広範囲の情報を得るためには、衛星を用いたデータを使用する方法²⁾と航空機を用いたデータを使用する方法がある。また既に整備された地図データを使用して GIS (Geographic Information System) 上で解析する方法³⁾も報告されている。衛星を用いた観測は数十 km 程度の広範囲のデータを取得できるが、安価な衛星画像の解像度は数m~数十 m であるため、市街地の景観を管理するためには不向きである。

数十 cm の高解像度の衛星画像も販売されるようになってきたが、非常に高価であるため簡単には利用できない。また地図データは各自治体で広く整備されるようになってきたが、景観に関する地図データを新たに作成しようとするとは非常にコストがかかる。また、詳細な高さデータが存在しないため、地形データを作成するとメッシュ間隔が広がってしまい、景観解析には適さない。

一方、航空機を用いた計測は、相対的にコストをおさえつつ広範囲の詳細な情報を取得することができる。航空機を用いた計測には、航空機搭載型 LiDAR(Light Detection and Ranging) 計測や航空写真による観測などがある。航空写真では RGB 情報からその地点の属性を得ることが出来るが、3次元座標を得るにはステレオ写真と写真測量の処理が必要になる。一方、航空機 LiDAR では計測点の属性を観測することは出来ないが、建物を含めた表面形状の3次元座標を簡便に得ることが出来る。

広範囲の詳細な3次元の座標を得ることで、道路上の任意の点における囲まれ感、あるいは解放感を

計測することができる。これらの情報は、街路景観を評価する指標として重要である。そのため、本研究では、航空機 LiDAR から取得したデータから景観指標を推定し、広範囲における推定値を簡便に取得することを目的として、道路上の任意の視点における圍繞度を推定することを試みた。

2. 対象地域と使用データ

(1) 対象地域

京都市東山区法観寺周辺の約 0.9 km×1.1 km の範囲を対象とした(図-1)。

この地域は、傾斜のある地域であるため、平坦な地域に比べ建造物の並び方が複雑である。このため、場所によって圍繞度に差が出やすいと思われる。また、高台寺、法観寺や清水寺など京都を代表する社寺や史跡が集積しており、京都市市街地景観条例において伝統的建造物群保存地区に指定されている。

(2) LiDAR とは

LiDAR とはレーザによって対象の3次元座標点群を取得する計測機器である。非接触で高精度な大量の点データを取得することが可能であるため、広範囲の計測に適している。LiDAR には地上設置型、車両搭載型、航空機搭載型のものがあり、本研究では航空機 LiDAR の計測データを使用した。

(3) 航空機 LiDAR とパルスモード

航空機 LiDAR 測量は、航空機の位置を知るための装置である”GPS(Global Positioning System)”と、航空機の傾きや加速度を測る装置である”IMU(Intertial Measurement Unit)”,そして”LiDAR(Light Detection and Ranging)”の3つの技術を組み合わせて行う。

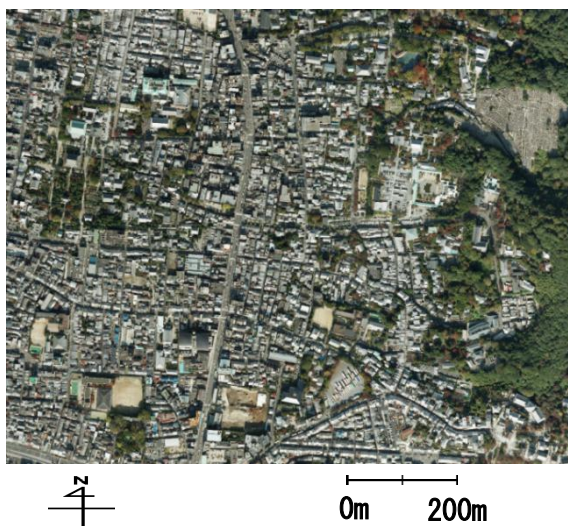


図-1 対象地域の航空写真(約 0.9 km×約 1.1 km)

航空機 LiDAR には複数のパルスモードが存在する。このうちラストパルスモードでは、反射光のうち最も遅く帰ってきた光線から反射点との距離を測定し、ファーストパルスモードでは、反射光のうち最も早く帰ってきた光線から反射点との距離を測定する。ラストパルスモードによる計測では、植栽が低い密度で分布している場合に、レーザ光が植栽を透過してしまい、植栽域において DSM(Digital Surface Model)が実際の植栽上面の標高よりも低く計測される可能性がある。そのため、ラストパルスモードによる計測は DTM(Digital Terrain Model)など地表面の標高を求めるのに適している(図-2)。一方、ファーストパルスモードによる計測では、植栽の密度が低い場合でも、レーザ光が植栽を透過しにくく、植栽上面の標高を取得できる可能性が高い。

圍繞度や緑視率推定のためには、地表面の標高と、建物や植栽上面の標高が必要であるが、ファーストパルスデータは既製品として普及しておらず、発注するのに費用がかかってしまう。それに対して地表面の標高を求めるのに適したラストパルスデータは一般的によく用いられており、既製品として安価に入手可能である。植栽ではファーストパルスデータの方が DSM 値を得るには適しているが、市街地の大半を占める人工構造物ではファーストパルスデータとラストパルスデータの推定高さの差が小さいため、本研究ではラストパルスデータを使用して差し支えないと判断した。本研究では広範囲のデータを使用するため、安価で入手しやすいラストパルスモードでの計測結果を使用した。

2002年6月(一部2003年2月)に取得した航空機 LiDAR データ(ラストパルスモード)を用いた。計測されてから約10年が経過しているため、一部建て替わった建物も存在する。そのため、後に検証を行う際は10年間で建物が建て替わっていないと思われる場所を選定している。LiDAR データの計測点密度は1m四方に1点、水平精度は±50cm、標高精

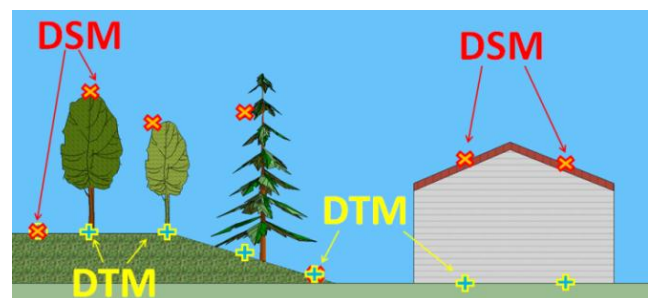


図-2 DSM と DTM

度は±15 cm である。諸元を表-1 に示す。

3. 圍繞度の推定

(1) 既存の研究

地図データと地理情報システムを利用して景観分析を行っている竹内ら³⁾の研究が挙げられる。この研究では、神戸を対象地域として、50 m メッシュの数値地図・地物モデルに ArcMap を組み合わせて得た 5 m グリッドデータから DSM を生成し、景観を評価している。

DSM データを用いて可視・不可視分析を行うことで夜景の可視領域を評価しているが、地図データから得られた DSM はメッシュ間隔が広いため、詳細な 3 次元情報は得ることが出来ず、本研究のように密集市街地の任意の点で景観を評価するには不向きであると考えられる。本研究でも DSM データを用いて景観を評価するが、航空機 LiDAR データを使用することで、詳細な 3 次元情報を取得する。

他に街路景観の研究としては、篠原・屋代⁴⁾の研究や亀野・八田⁵⁾の研究が挙げられる。

篠原・屋代の研究では、道路幅と建物の高さの比である街路幅員建物比など、街路景観の複数の要素を操作してその影響を基礎的に分析している。これによって、「囲まれ感」や「圧迫感」・「統合感」

をモデル実験から分析が可能となった。街路幅員に対する建物の比と囲まれ感の関係は、双曲線に近く、街路幅員に対する建物の比が大きくなるにつれて囲まれ感は大きくなるが、ある程度大きくなると飽和状態に達し、値が変化してもあまり囲まれ感に差が出なくなる。そのことをふまえ、本研究では囲まれ感を、視野中に方位角・仰角一定角度ごとに設定した視線のうち地物に遮られる視線の本数の割合で表すこととした。

亀野・八田の研究では、道路幅と樹木の高さの比である樹高幅員比と心理評価との関係をシミュレーション実験によって検証し、樹形別に望ましい樹高幅員比を求めることを目的としている。この研究によって樹高幅員比が街路空間の雰囲気表現する指標として、街路幅員建物高比とほぼ同様の値を示すことが判明した。本研究では、建物と樹木などの植栽を同じ地物として圍繞度を計算している。

一方、土屋⁶⁾の研究では、山裾地形を利用した庭園の景観を評価する際に、地形による圍繞を「囲まれ度」「囲まれ平均距離」「眺望度」で定量的に表現しようと試みている。但し、囲まれ度は「着目する地点から 16 方向のそれぞれの最大仰角が基準値以上の値を持つ方向数」と定義されている。16 方向や特定の仰角といった定義に基づく指標では、定量的な表現や汎用性という観点で不十分であるといえる。

表-1 航空機 LiDAR の諸元

地区名/取得者	東山/朝日航洋(株)
取得日	2002年6月~2003年2月
レーザーモデル	ALTM-1225DC
搭載航空機	Cessna 式 208 型
公称取得点密度	1 m 四方に 1 点
実質取得点密度	1 m 四方に 1 点
対地高度	900~1000 m
水平高度	±50 cm
標高制度	±15 cm (対地 1/2000 の場合)

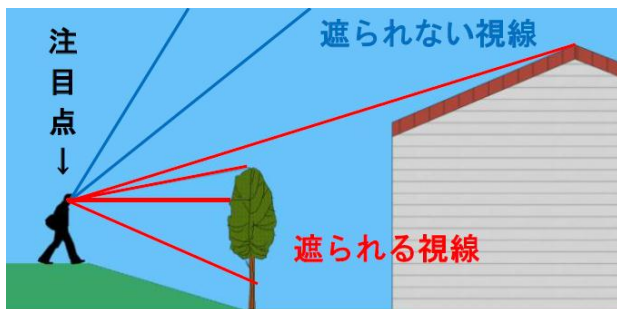
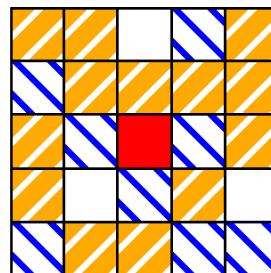


図-3 仰角と遮断・非遮断の判定



非地表面上・・・13
 地表面上・・・8
 欠損・・・3

この場合
 注目点を
 非地表面上の点と判断

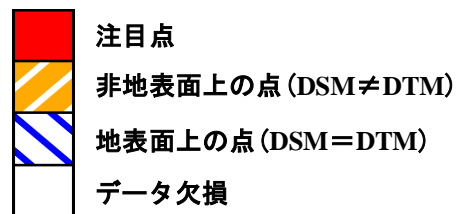


図-4 地表面の判定

(2) 圍繞度の定義と推定法

本研究では、まず視界に仰角 (-90~90 度)・方位角 (-180~180 度) ごとに視線を設定した。全視線数に対する、植栽や建物などの地物が遮る視線数の割合を本研究における圍繞度と定義した。視界内に設定した各視線について地物で遮断されるか否かを判断する。仰角、方位角の間隔は任意に設定できるが、計算量と精度の兼ね合いで 1 度を想定している (図-3)。ただし、仰角 90 度または -90 度の時、実際は方位角に関わらず視線が 1 本しかないが、他の角度と同様にすべての方位角について視線が存在すると仮定した。

$$\text{全視線数[本]} = 360 \times 181 = 65,160$$

遮断されるかの判断の際、視線の高さは 1.5 m とした。また、圍繞度の推定値を次のように求めた。

$$\text{圍繞度[\%]} = \text{遮断された本数} / \text{全視線数} * 100$$

(3) 航空機 LiDAR データの前処理

植栽、建物の高さを含む標高のモデルを数値表層モデル DSM(Digital Surface Model) と呼び、地表面のみの高さのモデルを数値標高モデル DTM(Digital Terrain Model) と呼ぶ。図-2 のように、DSM は建物や植栽がない場所では地表面の高さを表し、建物や植栽がある場所ではそれらの上面の高さを表す。一方、DTM は、建物や植栽の有無に関わらず地表面の高さを表す。航空機 LiDAR で計測されるのは DSM

の離散的な点群であり、Susaki⁷⁾の研究と同様の処理を行うことにより DTM 値を得、さらに補間を行うことで全点の DTM 値と DSM 値を得た。DTM 値 = DSM 値の点は地表面上の点である。

DTM 値と DSM 値の補間法について記す。DTM 値の補間では、注目点の周囲 24 点にある DTM 値を利用して補間を行った。DSM 値の補間では周囲 24 点の地表面上の点と非地表面上の点のうち多い方の属性を、注目点の属性に採用した。例えば図-4 のように、非地表面上の画素の方が地表面上の画素より多いとき注目点は非地表面上の点であると判断する。このとき、周囲 24 点すべてのデータが欠損している場合は注目点のデータを補間しない。注目点が非地表面上の点の場合は、周囲 24 点中の非地表面上の点の DSM 値を利用して補間を行い、注目点が地表面上の点である場合は DSM = DTM なので、DTM の値を DSM 値に採用した。補間した DSM・DTM の値は、すべての点についての補間の計算が終わった後で入力した。

近傍の 24 点を利用した補間では、距離の逆比を重みとして利用している。逆距離荷重法 (IDW 法) と呼ばれる方法である。注目画素の中心座標を (x_p, y_p, z_p) 、補間に用いた画素の中心座標を (x_i, y_i, z_i) 、補間に用いた画素から注目画素までの距離を d_i としたとき、重み ω_i は距離の逆数 $1/d_i$ である。 z_p 、 ω_i は式(1a)(1b)のように表される。

$$z_p = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i z_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (1a)$$

$$\omega_i = \frac{1}{d_i} = \frac{1}{\sqrt{(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2}} \quad (1b)$$

(x_p, y_p, z_p) : 注目画素の中心座標

(x_i, y_i, z_i) : 補間に用いた画素の中心座標

d_i : 補間に用いた画素から注目画素までの距離

ω_i : 重み(距離の逆数)

補間の流れを図-5 に示す。すべての点の DSM, DTM データが補間されるまで図-5 の枠内の操作を繰り返す。すべての点を補間した DTM データが図-6 上、DSM データが図-6 下である。

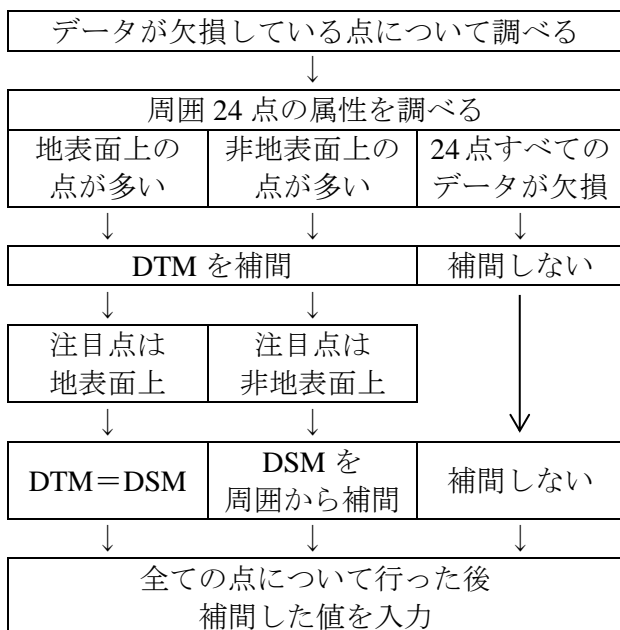


図-5 補間の流れ

(4) 囲繞度の推定

視線を直線とみたときに水平面上で東西の軸 (x 軸) となす角, つまり視線の方位角を φ_{eye} とする (図-7). また, 水平面 (xy 平面) となす角, つまり視線の仰角を θ_{eye} ($-90 \leq \varphi_{eye} \leq 90$) とする (図-8).
 まずは xy 平面上で視線が遮られるかどうかの判断に利用する点を選ぶ. 視線の起点である注目点を原点にした座標を考え, 視線上の点を (x_{eye}, y_{eye}) とする. d_{eye} を (x_{eye}, y_{eye}) から注目点までの距離として, $d_{eye} < d_{limit}$ を満たす点 (x_{eye}, y_{eye}) を考える. 今回は $d_{limit}=100(m)$ とした. dx_{eye}, dy_{eye} を式(2a)(2b)のように定める.

$$dx_{eye} = \cos\varphi_{eye} \quad (2a)$$

$$dy_{eye} = \sin\varphi_{eye} \quad (2b)$$

dx_{eye}, dy_{eye} はそれぞれ, 長さ 1 の視線における x_{eye}, y_{eye} の変化量である. dx_{eye} の絶対値が dy_{eye} の絶対値より大きい場合は x_{eye} を 1 ずつ変化させ, dx_{eye} の絶対値が dy_{eye} の絶対値より小さい場合は y_{eye} を 1 ずつ変化させる. また, dx_{eye} の絶対値と dy_{eye} の絶対値が同じであればどちらとも 1 ずつ変化させる. 囲繞度計算の流れを図-9 に示す. また, dx_{eye}, dy_{eye} と φ_{eye} の関係を表-2 に示す

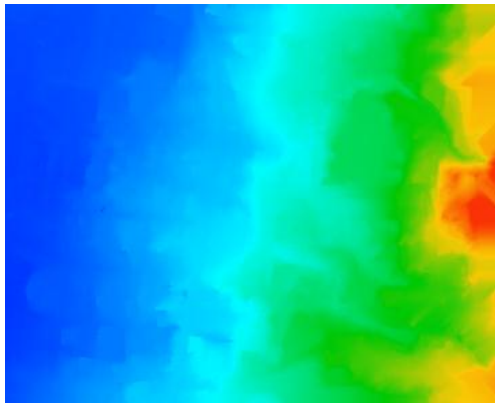


図-6 補間した DTM (上) と DSM (下)

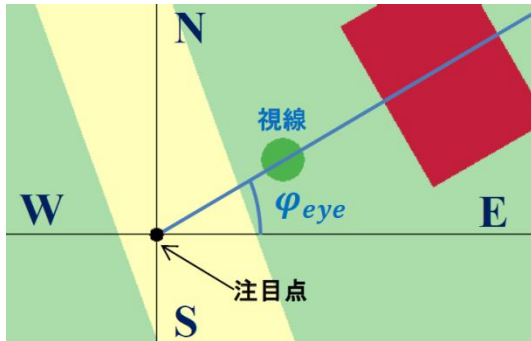


図-7 視線と方位角

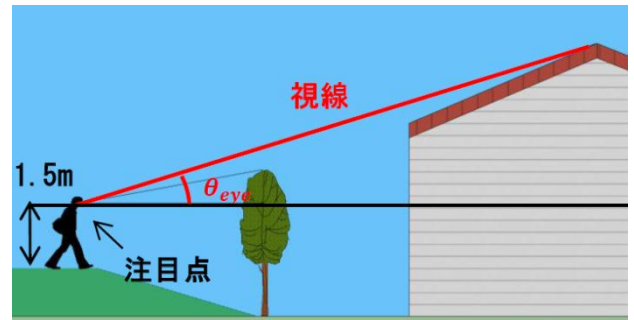


図-8 視線と仰角

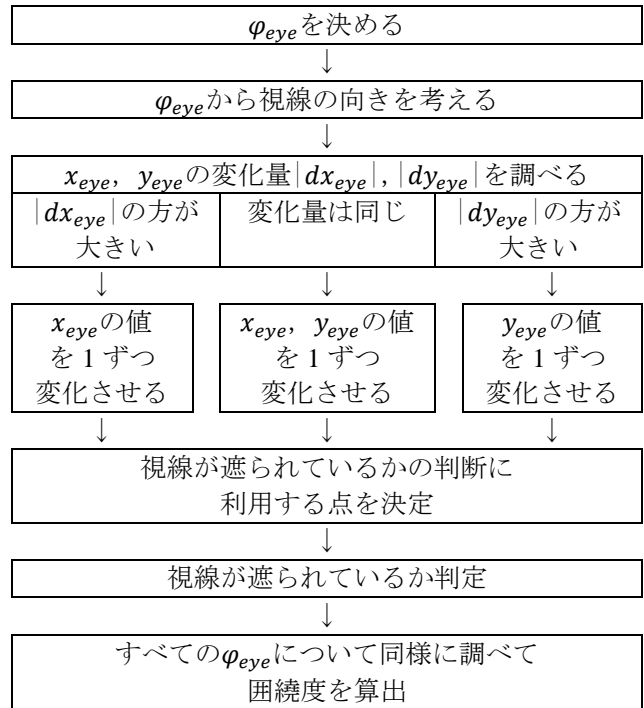


図-9 囲繞度計算の流れ

表-2 $dx_{eye} \cdot dy_{eye}$ と φ_{eye} の関係

$ dx_{eye} > dy_{eye} $	$0 \leq \varphi_{eye} < 45$ $135 < \varphi_{eye} \leq 180$
$ dx_{eye} < dy_{eye} $	$45 < \varphi_{eye} < 135$
$ dx_{eye} = dy_{eye} $	$\varphi_{eye} = \pm 45, \pm 135$

(5) 計算に用いる画素

$|dx_{eye}| > |dy_{eye}|$ のときは、注目点から x_{eye} の値を 1 ずつ変化させる。それぞれの x_{eye} に対応する y_{eye} が小数であるときは、 y_{eye} の小数第一位を切り捨てた値を y_{eye1} 、切り上げた値を y_{eye2} とし、 (x_{eye}, y_{eye1}) , (x_{eye}, y_{eye2}) の座標から (x_{eye}, y_{eye}) の座標を線形補間する。 y_{eye} が整数であるときは、 (x_{eye}, y_{eye}) の座標を持つ画素を視線が遮られるかどうかの判断に利用する。

$|dx_{eye}| < |dy_{eye}|$ のときは、注目点から y_{eye} の値を 1 ずつ変化させ、 $|dx_{eye}| > |dy_{eye}|$ のとき x_{eye} , y_{eye} を反対にして同様に計算する。 $|dx_{eye}| = |dy_{eye}|$ のときは、注目点から x_{eye} , y_{eye} の値をそれぞれ 1 ずつ変化させ、 (x_{eye}, y_{eye}) の座標を持つ画素を視線が遮られるかどうかの判断に利用する。

視線が遮られるかの判断の例として、 $\varphi_{eye} = -60$ 度の場合を考える。 $\varphi_{eye} = -60$ 度のとき $|dx_{eye}| < |dy_{eye}|$ であり、 x_{eye} は正、 y_{eye} は負である。 y_{eye} の値を 1 ずつ変化させた時、 (x_{eye}, y_{eye}) は表-3 のようになる。

表-3 において、 x_{eye1} は x_{eye} の小数第一位を切り捨

表-3 $\varphi_{eye} = -60$ 度の時の (x_{eye}, y_{eye})

x_{eye}	0	0.58	1.15	1.73	...	49.65	50.23
x_{eye1}	0	0	1	1		49	50
x_{eye2}	0	1	2	2		50	51
y_{eye}	0	-1	-2	-3	...	-86	-87
d_{eye}	0	1.16	2.31	3.46	...	99.30	100.5

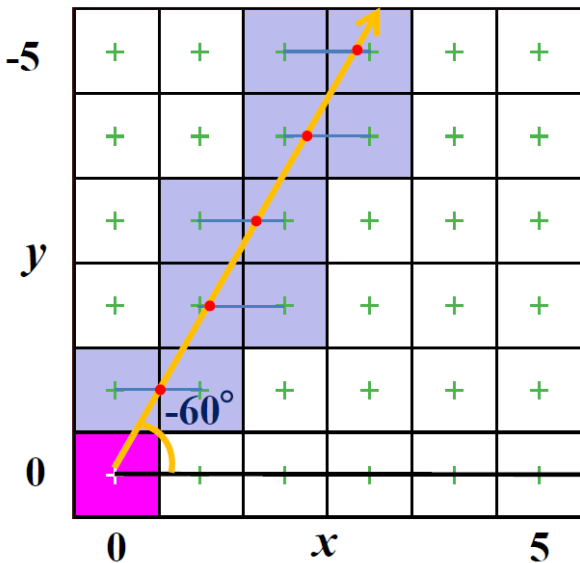


図-10 $\varphi_{eye} = -60$ 度の時利用する画素

てた値、 x_{eye2} は x_{eye} の小数第一位を切り上げた値である。 $d_{eye} < 100(m)$ を満たす (x_{eye}, y_{eye}) の座標にあたる DSM の値を視線が遮られるかどうかの判断に利用する。 $\varphi_{eye} = -60$ 度の場合表-3 より、 $(0.58,-1)$, $(1.15,-1)$, $(1.73,-2)$, $(2.31,-3)$... $(49.65,-86)$ の座標を利用する (図-10)。例えば、 $(0,-1)$ の DSM 値が 5.0, $(1,-1)$ の DSM 値が 1.0 のとき、 $(0.58,-1)$ の DSM 値は 2.7 となる。

(6) 視線が遮断される範囲の推定

視線が遮られるかどうかを仰角の大きさから判断する。ある φ_{eye} に対して視線が遮られるかどうかの判断に利用する点が決定した時、それらの点のうち dh/d_{eye} がもっとも大きい点を見た時の仰角を θ_{max} とする (図-11)。ただし d_{eye} は各点から注目点までの距離、 dh は注目点の目線との高さである。

$\theta_{eye} \leq \theta_{max}$ の時、仰角 θ_{eye} の視線は遮断されたと判断する。例えば $\varphi_{eye} = -50$ のとき $\theta_{max} = 55$ であったとする。方位角 $\varphi_{eye} = -50$ である 181 本の視線のうち、 $\theta_{eye} \leq 55$ である 146 本の視線は遮られ、残りの 35 本は遮断されていないと判断する (表-4)。

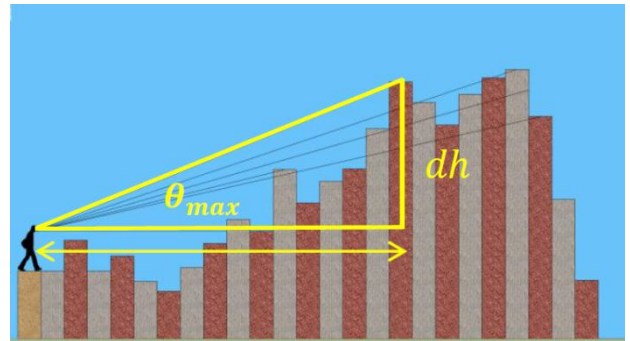


図-11 遮断の判定

表-4 $\theta_{max} = 55$ の時の遮断判定

θ_{eye}	遮断の判定(遮断=×)
-90	×
-89	×
	×
55	×
56	○
	○
90	○

×(遮断本数)	146
○(遮断されない本数)	35
合計	181

同様の計算を方位角-180~180度のすべての方位角について調べ、合計 65,160 本の視線のうち何本が遮られているかを計算する。囲繞度は遮断された本数/全視線数である(表-5)。ある地点の囲繞度を判定した結果を図-12 に示す。この地点の囲繞度は 65.5% と推定された。

4. 結果

(1) 囲繞度の実測値

囲繞度の実測値を SIGMA4.5 mm F2.8 EX DC を用いて計測した。このカメラは全周魚眼型の魚眼レンズである。全周魚眼レンズの特徴は、画角が非常に広く、撮影される写真が円形になることである。

このカメラを用いて前後計 2 枚の写真を撮影することですべての方向を撮影することが出来る。また、

このレンズは等立体角射影方式を採用しており、写真の面積が実際の視界における立体角に比例する。撮影は 2012 年の 5 月と 11 月に行った。LiDAR データと約 10 年の差があるため、10 年以内に建物が変化していないと思われる場所で計測した。

推定値の妥当性を検証するため、対象地域内の計 30 地点で計測を行った。まず、魚眼レンズの中心を水平方向に設置して各地点で前後計 2 枚の写真を撮影した。次に、撮影した画像を、推定値と同じく縦軸が仰角、横軸が方位角になるよう変換した。変換した画像を空の部分とそれ以外の部分に手動で分類し、囲繞度の実測値を(空以外の面積)/(全体の面積)として計算する。撮影の際のカメラの高さは、推定値と同条件にするため、1.5 m とした。図-14 上は、図-13 の 2 枚の写真を変換したものであり、図-14 下は空部分を塗り分けたものである。図-14 下より、この地点での囲繞度の実測値は 71.5% である。30 点の検証点の位置を図-15 に示す。

表-5 囲繞度の判定

φ_{eye}	視線の数	遮断本数
-179	181	105
-178	181	100
-50	181	146
180	181	110
合計	65160	42707
囲繞度	65.5%	



図-13 撮影した画像

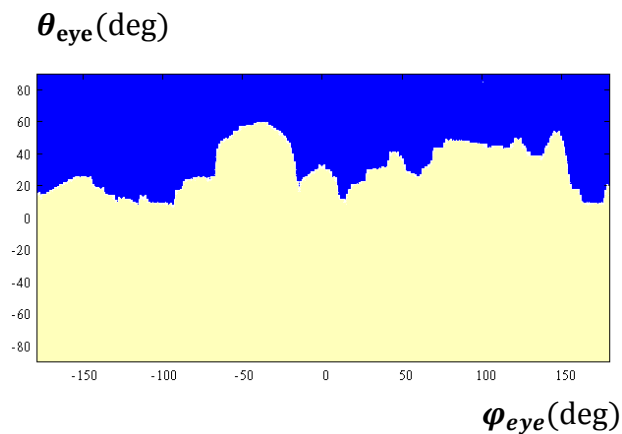


図-12 囲繞度推定結果

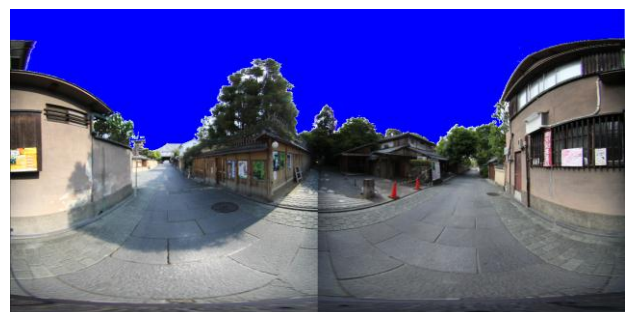


図-14 変換した画像(上), 空を塗り分けた画像(下)

(2) 対象範囲の推定結果

図-1と同じ対象地域の囲繞度推定結果を図-16に示す。囲繞度が低い方から赤色に近いほど高くなっており、囲繞度が高い点は暗く表示される。家屋などの建造物が密集した地域の細い道路では、暗い色の画素が多く、囲繞度が高くなっているのがわかる。一方で運動場や広い道路上など、広い空間が存在する地点では薄めの色になっており囲繞度は低くなっているのがわかる。

検証地点における計算結果と実測値を図-17に示した。平均二乗誤差 $RMSE = 約 3\%$ と精度よく推定することが出来た。ただし計算を行ったのは道路上の点のみである。

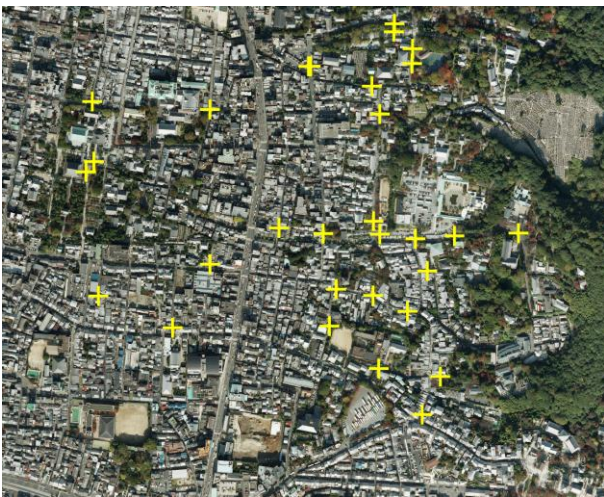


図-15 検証地点の位置

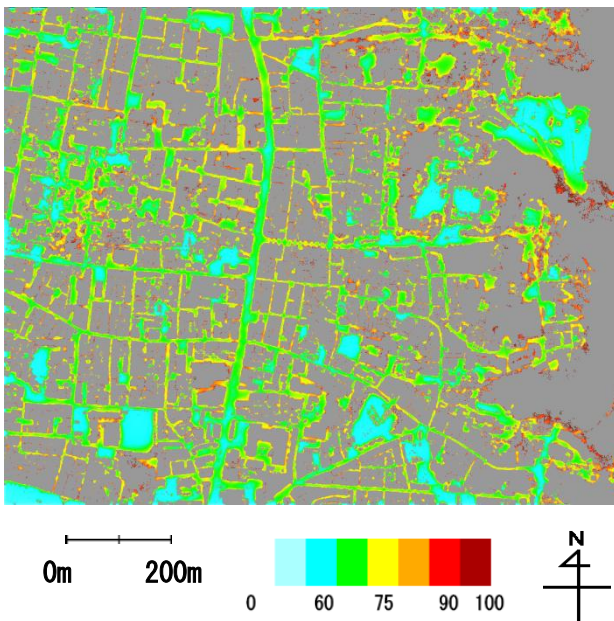


図-16 図-1と同範囲の囲繞度推定結果

(3) 航空写真との重ね合わせ

対象範囲の一部において航空写真に囲繞度推定結果を重ね合わせた画像が図-18である。図-18より同じ道路上でも建物との境界に近い端の方は、道の中央に比べ囲繞度が高くなっていることがわかる。また、建物が存在しない広い空間では囲繞度が低くなっていることもわかる。ラストパルスモードによる計測であったため、植栽域にも一部地表面上の点が存在しているが、植栽に囲まれているため、囲繞度は高くなっている。同様に植栽と建物の間に存在する点も囲繞度が高くなっている。

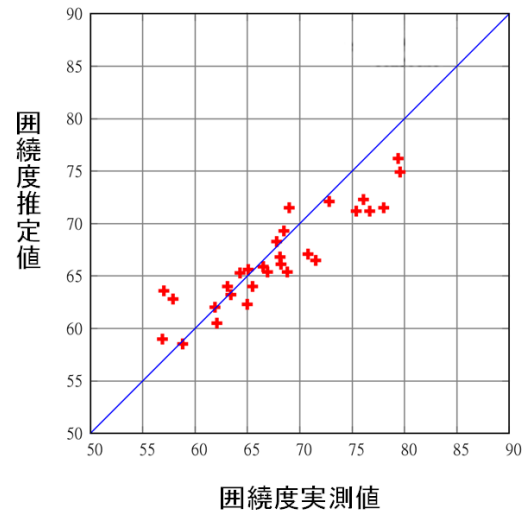


図-17 囲繞度推定値と実測値の比較

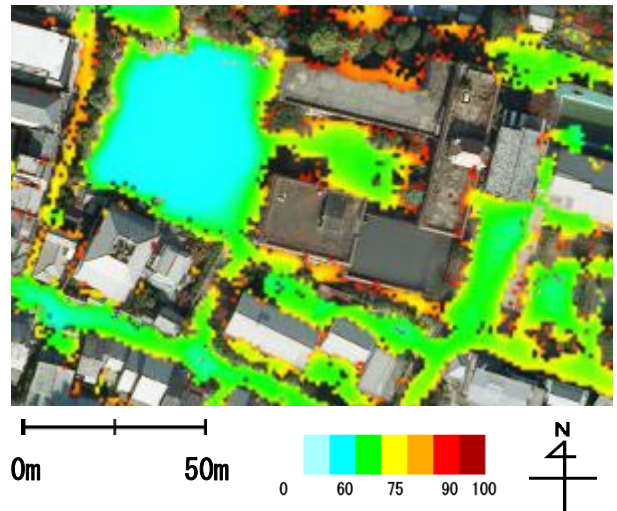


図-18 囲繞度推定結果(航空写真)

5. 考察

(1) 囲繞度推定の妥当性

囲繞度の推定値と実測値の平均2乗誤差RMSEは約3%であり、大きなばらつきもなく、航空機LiDARデータから囲繞度を妥当に推定することが出来た(図-19).

(2) 計算時間

視線が遮断されているかどうかを判断するための点を選ぶ際、注目点からの距離 d_{eye} に制限 d_{limit} を設けるかどうかで計算時間は変化する。 d_{limit} を設けない場合、 d_{eye} は最大で1472.4である。この時、約30万点ある対象範囲全域の道路上の点の囲繞度を計算するには300分以上を所要する。今回の対象範囲は、建物が密集している地域が多いため、注目点からの距離を制限することで、囲繞度の計算に用いる点数を減らし計算時間を短縮することを考える。

表-6にRMSEが d_{limit} によってどのように変化するかを示す。 d_{limit} が小さくなるほど計算に用いられる点数は減少し計算時間は短縮する。 $d_{limit}=100$ まではほとんどRMSEが変化しないが、 $d_{limit}=50$ より小さくなると次第にRMSEが大きくなる。これは、視線を遮っていた地物が、 d_{limit} が小さくなるにつれて囲繞度計算の際の探索範囲から外れていき、囲繞度がさらに過小評価になってしまったためである。

囲繞度が高い場所に比べ、囲繞度が低い場所の方が d_{limit} の変化による影響を受けやすかった。これは、囲繞度が低い地点では、視線を遮る地物が注目点から比較的離れた地点に多いため、 d_{limit} が小さくなっ

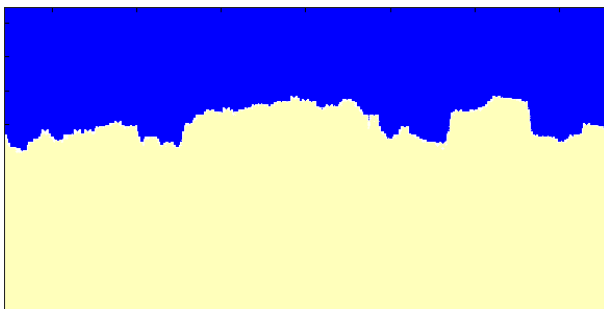


図-19 囲繞度推定値(上)と実測値(下)の比較

た際に、探索範囲から外れてしまう地物が多かったためと考えられる。今回、囲繞度の推定では、制限なしの場合とRMSEがほぼ同じとなる $d_{limit}=100$ で計算を行った。 $d_{limit}=100$ のとき、約1km四方の対象範囲の囲繞度を求めるのに要した時間は約70分であり、短時間で広域の囲繞度を推定することができたと言える。

また本研究で使用した航空機LiDARデータは2002年に計測されたものであるが、近年 1m^2 あたり数点から数十点も計測できる高密度LiDARデータを計測できるようになっている。本研究で囲繞度を計算する際に、仰角、方位角の間隔を1度に設定した。詳細は割愛するが、計算時間を削減するためにこの間隔を10度や5度に大きくすると、囲繞度の推定精度が低下することが確認できた。一方で、間隔が3度や2度になると1度とほぼ同等の精度が得られることが確認できた。このことは、仮に高精度のLiDARデータが得られても囲繞度の推定精度が大幅に向上することにはつながらないことを示唆している。したがって、本研究で使用しているLiDARデータは高密度ではないものの、囲繞度推定においては全く問題ないと言える。

(3) 方向による囲繞度の変化

a) 最大囲繞度と最小囲繞度

本研究では囲繞度を方位角 $-180\sim 180$ 度の合計360度として計算したが、実際の視界に入るのはこのうち180度程度である。そのため、向く方向によって囲繞度に変化する。方位角を180度ずつに分割して囲繞度を計算し、囲繞度が方向によってどのように変化するかを求める。

表-6 囲繞度推定値と実測値の比較(1画素=1m)

囲繞度推定値 d_{limit} [m]	実測値 RMSE[%]
なし(最大1473)	2.86
150	2.87
100	2.87
50	2.91
25	3.25
15	4.96

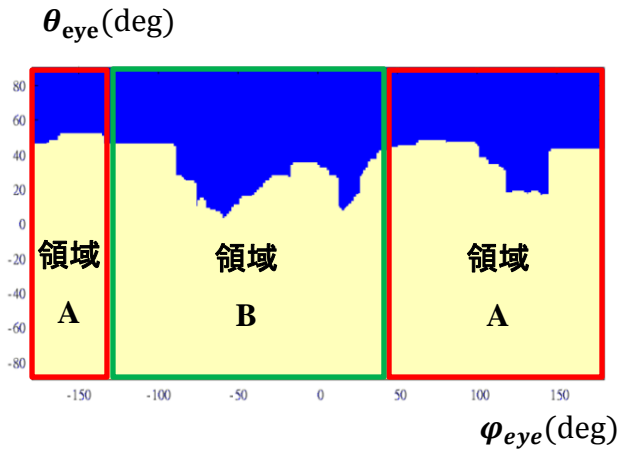
例えば、図-20はある地点の視線の遮断結果（圍繞度 68.2%）を示しているが、この結果を、両端の四角（領域 A）の和と中央の四角（領域 B）の2つの範囲に分割する。このとき、分割はそれぞれの範囲の圍繞度の差が最大になるよう分けた。図-20においては、両端の四角の和での圍繞度が 71.5%，中央の四角での圍繞度が 64.7%である。このときこの地点において最大圍繞度は 71.5%，最小圍繞度は 64.7%であると定義する。また、前節までで求めた、方位角 360 度で考えた時の圍繞度を平均圍繞度とする。

b) 圍繞度の変化

図-18と同じ範囲を対象に、最大圍繞度と最小圍繞度を求め、最大圍繞度を図-19上に、最小圍繞度を図-21下に表す。2枚とも図-18と同じ色に塗り分けており、同じ色の点は圍繞度の値が同じである。

図-21上を見ると、図-18より道路の端や建物のそばの点、図の左上にある広い空間の端の点などの色ははっきりと変化していることがわかる。また、図-21下を見ると、道路や広い空間などの領域内で色

があまり変化せず、全体的に薄い色になっているが、図の左側の非常に細い道や、図の中央上部の建物と植栽の隙間にあたる部分では、全体的に濃い色となっている。最大圍繞度と最小圍繞度を比較することで、それぞれの点における周囲の状況を知ることが出来る。道路の端や建物のそばの点では、建物の方を向いた際に圍繞度が高くなりやすく、最大圍繞度が周囲の点に比べ高い。しかし、建物と反対側は広い空間である場合が多く、最小圍繞度は周囲の点とあまり値が変わらない。したがってこのような点では、最大圍繞度と最小圍繞度の差が大きくなりやすい。図-22は圍繞度の差が大きい点の例である。この地点のすぐ東側には建物が建ち、西側は広い空間になっている。この地点の平均圍繞度は 73.3%，最大圍繞度は 89.9%，最小圍繞度は 56.7%であり、方向によって 30%以上圍繞度に変化する。一方、道路の中央や近くに建物が存在しない点では最大圍繞度と最小圍繞度はともに低く、圍繞度の差は小さい。また、ほぼすべての方向で植栽や建物に囲まれた点はどちらの圍繞度も高く、差は小さい。



領域 A	最大圍繞度	64.7%
領域 B	最小圍繞度	71.5%
全体	平均圍繞度	68.2%

図-20 視界の分割

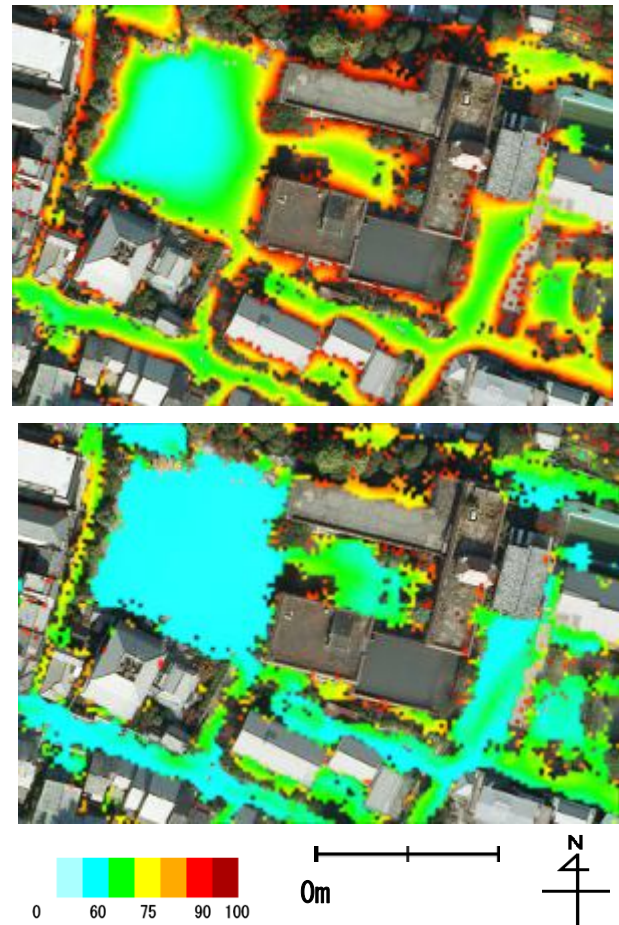


図-21 最大圍繞度(上), 最小圍繞度(下)

図-23 は圍繞度の差が小さい点の例である。この地点は広い空間の中央に位置し、平均圍繞度は 56.9%、最大圍繞度は 57.2%、最小圍繞度は 56.6%と、圍繞度の差が 1%未満である。

c) 圍繞度の変化

これらの結果をまとめると、最大圍繞度と最小圍繞度の差が大きい点では、計測点のそばの特定の方向に高い地物が存在する可能性が高く、最大圍繞度と最小圍繞度の差が小さい点では、周囲の状況が方向によってあまり変化しないことがわかる。また、差が小さい場合は、その値が高いかどうかによって、広い空間上の点であるか、建物や植栽に囲まれた点であるかを判断することができる。

図-21 の範囲において道路上の点全点における最大圍繞度と最小圍繞度の差の平均は 11.2%であった。最大圍繞度と最小圍繞度を組み合わせることで、全体でどの程度囲まれているかどうかだけでなく、方向によって圍繞度がどの程度変化するかを知ることができ、その点の周囲の状況を知ることができる。平均圍繞度が同じである点でも、方向によって圍繞度が大きく変化する点や、どの方向を向いてもほぼ同じ圍繞度である点が存在するため、圍繞度が方向によってどのように変化するかを求め、周囲の状況を知ることが、広範囲の景観を管理する上で役立つと考えられる。

6. まとめと今後の課題

(1) まとめ

本研究では、航空機 LiDAR データを用いて、道路上の任意の視点からの圍繞度を推定する手法を開発した。京都市東山区法観寺周辺の約 1km 四方を対象とし、まず航空機 LiDAR から得られた DSM デー

タ・DTM データを補間した。次に、「圍繞度 = 視界内の全ての地物の立体角 / 視界の立体角」であると定義し、地面・建物・植栽などに遮断された視線数[本]を全視線数[本]で除した値を圍繞度推定値とした。また、対象地域内 30 点の検証点で全周魚眼レンズを用いて撮影を行い、写真上の面積比から圍繞度実測値像を求めた。圍繞度推定値の検証点 30 点における圍繞度実測値との 2 乗誤差 RMSE = 約 3%であり、対象地域の地表面上の点からの圍繞度を計算するのに所要時間は約 70 分であった。検証点すべてにおいてやや過小評価ではあったが、短時間で妥当に圍繞度を推定することが出来た。さらに、方位角を 180 度ずつに分割したときの最大の圍繞度と最小の圍繞度を求め、向く方向によって圍繞度が変動しやすいかどうか知ることができるようになった。

(2) 今後の課題

本研究では圍繞度の推定手法に限定して報告したが、地方自治体では緑視率の推定を希望する場合もある¹⁾。緑視率の推定方法と圍繞度の推定方法は本質的には同じであり、前者が植生のみを対象とするのに対し、後者は全ての地物を対象として遮断される視線数を計算する。緑視率の推定のために、航空写真の RGB 情報などを利用して植栽領域を抽出し、今回の手法を発展させることで緑視率の計算を行えるようにすることが今後の課題である。また航空機 LiDAR データの取り扱い経験がある地方自治体は限られるものの、多くの自治体が固定資産税調査等のために航空写真を定期的に取得している。そのため、ステレオ航空写真から写真測量を通じて生成した 3 次元点群だけで、つまり航空写真のみを用いて圍繞度、緑視率を推定できるようになることも今後の課題である。

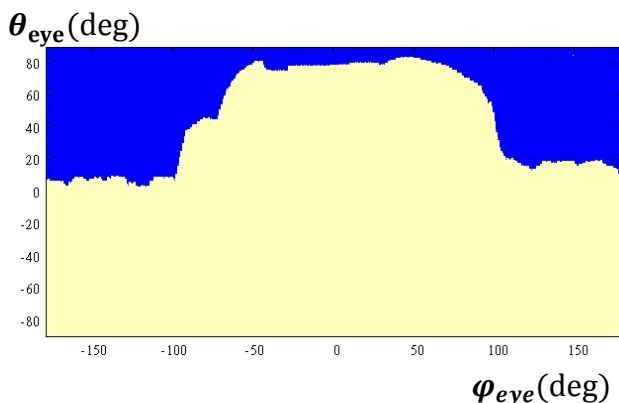


図-22 方向により圍繞度が大きく変わる点の例

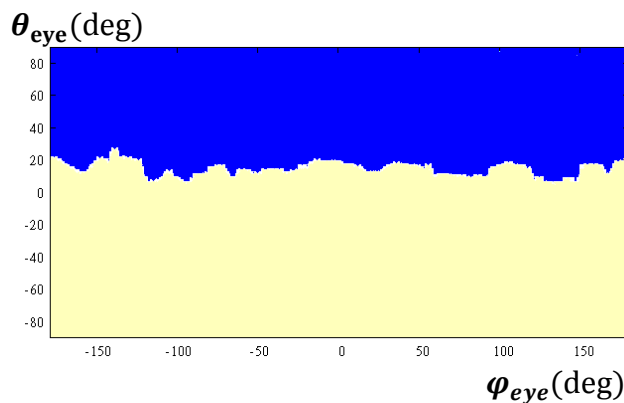


図-23 方向により圍繞度があまり変わらない点の例

参考文献

- 1) 西宮市景観計画, http://www.nishi.or.jp/media/2011/keikankeikaku_nishinomiya2011.pdf, 2011.
- 2) 前田憲治, 吉川眞, 田中一成: 都市における緑環境の分析, 景観・デザイン研究講演集, No.4, pp.40-45, 2006.
- 3) 竹内陽, 吉川眞, 田中一成: 空間データを用いた神戸の景観分析, 景観・デザイン研究講演集, No.4, pp.182-185, 2008.
- 4) 篠原修, 屋代雅充: 街路景観のまとまりに及ぼす沿道建物の効果に関する計量心理学的研究, 土木学会論文集, 第 353 号, pp.131-138, 1985.
- 5) 亀野辰三, 八田準一: 「樹高幅員比」に基づく景観イメージの評価, 日本造園学会誌 VOL.61 NO.5, 第 353 号, pp.617-620, 1998.
- 6) 土屋峻: 京都における山辺の景勝地の立地と風景の見せ方に関する研究, 京都大学工学研究科修士論文, 2010.
- 7) Susaki, J., "Adaptive slope filtering of airborne LiDAR data in urban areas for digital terrain model (DTM) Generation", Remote Sensing, vol. 4, pp.1804-1819, doi:10.3390/rs4061804, 2012.

(2012. 10. 17 受付)

Development of Method to Estimate Enclosure Index in Urban Areas using Airborne LiDAR

Yuto KOMIYA, Junichi SUSAKI and Yukari UEDA

This paper proposes a methodology to estimate an “enclosure index” in urban areas using airborne LiDAR. The index is defined as a ratio of occluded area to whole of area in azimuth angle-elevation angle space. The index can be applied to assess local landscape, and it is expected to estimate it in a wide area at low cost. The author examined the methodology to estimate it using airborne LiDAR data measured in last-pulse mode. The estimated index map was validated with the ground truth data, and the error was acceptable, approximately 3%. Even though the last-pulse mode data may underestimate actual digital surface model (DSM), it was found that the proposed methodology is effective to estimate the index in a wide area at low cost.