航空 LiDAR データとグラフ理論を用いた 森林作業道線形の設計に関する研究

Study on automatically designing of strip road alignment using airborne LiDAR data and graph theory

洲濱 智幸*

Tomoyuki SUHAMA

Abstract : The forest road network, which has arranged the path through the forested area appropriately, is required for the suitable management of the forest resources to raise the productivity of the forestry. Especially the efficiency of the tree logging work using the forwarder is related to the connectivity of the strip road between the logging area and the main forest network. Therefore, appropriate designing of strip road is one of the important factors for considering the break-even point of the commercial forestry management.

Generally, designing of strip road is carried out in following manners. 1) With reference to topographic maps, forest planning maps, aerial photos, etc., domains to be avoided in route locations, such as a steep slope and a danger zone, is classified. 2) Basic alignment of strip road that includes starting point, terminal point, and some major node points is drafted on a map. 3) Basic alignment is actually field surveyed for the final decision. In previous study, the method of designing the forest road network automatically adapting graph theory has been studied. Under consideration of previous study, it is thought possible to examine the way to determine automatically basic alignment of strip road.

This research shall be examined on automatically designing of strip road using graph theory and DEM measured by airborne LiDAR. Especially the relation of the alignment of the strip road and the edge direction composed the network of graph theory is considered.

1. はじめに

森林資源の適切な管理によって林業生産性を高めるためには、森林地域を適切に結んだ路網を構築することが必要である。なかでも、施業を行う伐区と土場・林道を結ぶ作業道の良し悪しは、フォワーダといった重機による集材効率に関係し、伐採・搬出に係る損益分岐を決める重要な因子のひとつである。このため、作業道を適切に設計する手法を確立することは、経済的に成り立つ産業として林業を育成するために必要とされている。

作業道は、伐区から土場・基幹作業道までを結ぶ経路であり、詳細な現場情報を用いて設計される。一般的に作業道の路線形状設計は、①地形図・森林基本図・

空中写真等を参照し、急傾斜地や危険地帯などの路線選定において避ける必要のある領域を区分けして安全な領域を路線候補地とし、②起点・重要通過点・終点を含む概略路線を図上で仮決定して仮路線の地形勾配を把握し、③仮路線を実際に踏査して最終決定する、といったながれで実施される。ここで路線形状を最終的に決定するためには、想定した危険箇所のほか、地質・微地形・水分状態などの、資料だけでは判断できない詳細な情報を現地で確認しなくてはならない。

既往研究によると、神崎（1965, 1966）は、山土場を作ることでできる複数地点間を結ぶ路網の組み合わせのなかから、グラフ理論によって総延長が最短距離になる路網を計算する方法を提案している。また斎藤（2012）は、航空 LiDAR によって計測された高解像度 DEM を使い、8 林班を結ぶ基幹作業道の候補線をシュタイナー木によって推定し、制限傾斜角内で、且つ開設に伴う土工量を最小化する候補線線形を計算する方法を検討している。これらの成果によると、最終

*株式会社パスコ

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 52, NO. 4, 2013

的に現地で確認することを想定した、仮路線（概略作業道）の線形を計算する手法を開発することは可能であると考えられる。これは、②起点・重要通過点・終点を含む概略路線を図上で仮決定して仮路線の地形勾配を把握する工程に該当する。

そこで本論文は、航空 LiDAR によって測定された DEM にグラフ理論を適用し、概略作業道の線形を自動的に設計する方法について研究した。特に、概略作業道を空間ネットワークと見立て、それを構成するエッジ探索方位と、計算された概略作業道の地形追従性の関係について検討した。

2. 概略作業道の線形計算方法

2.1 エッジに対するコストの設定

ダイクストラ法 (Dijkstra, 1950) はグラフ理論における最短経路探索アルゴリズムであり、空間ネットワークで結ばれた二つのノード間の最適パスを効率的に求める手法である。いま DEM の画素中心をノードとし、8 近傍のノード間をエッジで結ぶ図 1 の空間ネットワークを例にする。ここで、円はノードを、線はエッジを表し、各エッジにはエッジを通過するために必要なコスト C が設定される。ここでコストにはノード間の水平距離・傾斜角・斜距離などの数値を設定することができる。また、エッジは上りと下りの両

方を考慮する必要があることから無方向性であり、一箇所のエッジに対して、ひとつのコストが設定される。ダイクストラ法は、スタートノード S からゴールノード G 間を結ぶ多数のパスのなかから、総コストを最小にする最適パスを計算するものであり、最適パスを構成するノードとエッジの組み合わせを概略作業道の線形と見なすことができる。

図 1 において、ノード間の水平距離をコストに設定すると、例えば S から G への最適パスは R_1 となり、総コスト C_1 は式 1 で表すことができる。

$$C_1 = C_{S-44} + C_{44-43} + C_{43-32} + C_{32-G} \quad (1)$$

次にノード間の斜距離をコストに設定すると、エッジの水平距離だけでなく傾斜角も評価した最適パスが計算される。例えば総斜距離を最小化する最適パスとして R_2 が計算され、総コスト C_2 は式 2 で表すことができる。

$$C_2 = C_{S-34} + C_{34-23} + C_{23-12} + C_{12-21} + C_{21-G} \quad (2)$$

ここで最適パスは、 C_2 を最小化することだけを条件として計算されることから、最適パスに含まれるエッジのなかには比較的大きな傾斜角を示すものが含まれる可能性がある。そこで、図 1 に示した空間ネットワークを、あらかじめ制限傾斜角以下のエッジだけで構築しておくことによって、計算される概略作業道の最大傾斜角を制限することができる。

図 1 DEM の画素中心をノードとした空間ネットワークの例

2.2 エッジ方位と地形追従性

図 1 に示した 8 方位のエッジでノード間を結ぶ空間ネットワークは、DEM の最急勾配線を結んで流水線を作成するなど、GIS による地形解析において一般的に用いられている。ノード間の標高差を基にした斜距離などをコストにするならば、DEM の画素中心をノードとする空間ネットワークは計算上都合が良いといえる。しかし、実際の作業道設計では地形に応じて柔軟に方位を設定することから、探索方位が 8 方位に限定された空間ネットワークでは、現実的な線形と乖離することも考えられる。

一方、村井ら (1973) は DEM を用いた土工量の計算において、DEM の解像度が切・盛土量の推定誤差に影響するとしている。推定誤差が DEM による地形再現性の良し悪しに関係しているとするならば、本研究においても DEM の解像度を適切に調整することによ

図2 8・16・24方位の空間ネットワーク構造

て現実に近い線形を推定することができると考えられる。しかし、DEMの解像度を高めると空間ネットワークのノード数は二乗で増加し、ダイクストラ法の計算に膨大な時間を要することが考えられる。

そこで本研究はDEMの高解像度化を避け、図2に示すような中間方位を加えた16方位及び24方位を探索することによって空間ネットワークを構築し、探索方位の違いが線形に及ぼす影響について検討することとした。

3. 概略作業道の線形推定

3.1 対象地及び使用データ

対象地の位置を図3に示す。対象地は福岡県と大分県の境界に位置する大分県日田市の人工林である。解析に用いた航空LiDARの計測仕様を表1に、対象地の航空写真を図4a及び図4bに示す。ここで、図4a及び図4bに重ね合わせ表示しているラインデータは、既設作業道の線形を航空写真上でデジタル化したものである。これらを見ると、対象地にはA1:A2:A3, B1:B2:B3を結ぶ作業道が敷設されていることがわかる。このうちA1:A2パス及びB1:B2パスは大きく蛇行しており、フォワードによって伐区内を集

図3 対象地の位置

表1 航空LiDARの計測仕様

メーカー	Leica Geosystems
機器名称	ALS70
パルスレート (Hz)	500,000
標高計測精度 (cm)	13~30
スキャン角度	±37.5°
計測日	2012年9月21日
レーザ計測点密度 (点/m ²)	1点以上
DEM画素サイズ	リサンプリングにより4m

材走行することを想定した作業道であると想像できる。一方、A2:A3パス及びB2:B3パスは蛇行が緩やかであり、伐区間移動を重視した作業道であると想像できる。

次に、フィルタリング処理によって樹木などの地表物を除いたレーザ点群データを航空写真上に重ね合わせ表示し、既設作業道に重なるレーザ点を目視によって除去したのち、TIN (Triangulated Irregular Network)によって標高値をリサンプリングした。ここで、DEMの画素サイズは4mとした。ここでDEMの解像度は、ダイクストラ法の計算に用いたプログラムのメモリの制限から決定した。

これらの処理によって作成したDEMの斜面陰影図を図4c及び図4dに示す。航空写真と比較すると既設作業道の領域が滑らかになっており、DEMに含まれていた既設作業道の影響が適切に除去されていると考えられる。

既設作業道の全延長における平均傾斜角 (路線勾配)、第3四分位傾斜角、総斜距離 (路線延長)を計算した結果を表2に示す。大分県 (2013)によると、作業道の傾斜角は12°以下を標準とし、やむを得ない場合は100m以内の短区間に限って17°以下とすることができるとされている。また林野庁 (2010)によると、概ね10°以下を標準とし、やむを得ない場合は短区間に限って概ね14°程度にすることができるとされている。既設作業道のパスごとの平均傾斜角の最大値は12.1° (A2:A3パス)であり、第3四分位傾斜角の最大値は17.2° (A2:A3パス)となっており、概ね大分県の基準に準じて敷設されていることがわかる。

a) 航空写真 (A 領域)

b) 航空写真 (B 領域)

c) 4 mDEM (A 領域)

d) 4 mDEM (B 領域)

図4 対象地の航空写真及び解析に用いた4mDEM

表2 既設作業道線形の特性

A 領域	A1 : A2パス			A2 : A3パス		
	傾斜角 (°)		総斜距離 (m)	傾斜角 (°)		総斜距離 (m)
	平均	第3 四分位		平均	第3 四分位	
	10.2	14.2	576.7	12.1	17.2	443.4
B 領域	B1 : B2パス			B2 : B3パス		
	傾斜角 (°)		総斜距離 (m)	傾斜角 (°)		総斜距離 (m)
	平均	第3 四分位		平均	第3 四分位	
	7.0	9.9	649.5	9.0	13.6	491.1

3.2 結 果

大分県 (2013) 及び林野庁 (2010) に従い、エッジの制限傾斜角を [10°, 12°, 14°, 17°] に設定して空間ネットワークを構成し、斜距離をコストとして最適パスを計算し、概略作業道の線形を得た。

A 領域の一部について、制限傾斜角12°にして構成し

た空間ネットワークを図5に示す。図5aを見ると、12°を超えるエッジが除去されたために、南北方向の空間ネットワークが分断されている領域があることがわかる。これは、8方位で最適パスを計算するためには、少なくとも図5aで表示されている範囲の外を大きく迂回しなければならないことを表している。そして、図5b及び図5cを見ると、中間方位を加えることによって全領域で空間ネットワークが接続しており、空間ネットワークの地形追従性が高まっていることがわかる。

制限傾斜角の各数値ごとに最適パスを計算し、平均傾斜角と総斜距離を計算した結果を表3に示す。ここで、グレーでハッチングされているセルは、空間ネットワークが分断されたために、最適パスを計算することができなかったことを示している。

8方位で制限傾斜角10°の条件では、いずれのパスにおいても最適パスを計算することができなかった。そして、8方位で制限傾斜角12°の条件では、A2 : A3パス

図5 方位による空間ネットワーク構造の違い（制限傾斜角12°，A領域の一部）

表3 計算された概略作業道線形の特徴

探索方位	制限 傾斜角 (°)	A 領域				B 領域			
		A1：A2パス		A2：A3パス		B1：B2パス		B2：B3パス	
		平均傾斜 角 (°)	総斜距離 (m)	平均傾斜 角 (°)	総斜距離 (m)	平均傾斜 角 (°)	総斜距離 (m)	平均傾斜 角 (°)	総斜距離 (m)
8 方位	10								
	12	7.5	743.1			8.4	328.8	8.0	591.2
	14	8.2	647.7			8.4	315.6	7.4	524.6
	17	10.8	436.1			8.6	309.1	7.3	482.3
16方位	10	7.1	648.2	5.8	497.8	7.5	355.9	5.5	486.5
	12	9.0	497.7	6.6	430.9	8.4	316.1	6.1	463.1
	14	10.8	420.3	8.0	407.6	8.6	308.8	6.5	456.6
	17	14.0	326.7	9.7	387.7	8.7	306.9	7.7	449.2
24方位	10	8.1	552.9	5.8	433.4	7.8	339.8	6.4	457.5
	12	9.8	461.9	6.9	407.8	8.4	312.8	7.0	451.2
	14	12.0	379.4	8.7	396.8	8.7	307.2	7.8	446.2
	17	15.7	293.5	9.2	378.0	8.6	306.0	9.2	442.1

において最適パスを計算することができなかった。これは、対象地域について、大分県による制限傾斜角基準で、探索方位を8方位にした場合、最適パスを計算することが出来ないケースがあることを示している。

16方位及び24方位の場合は、すべての制限傾斜角及びパスにおいて、最適パスを計算することができている。そして、各最適パスの総斜距離に注目すると、制限傾斜角を大きく設定するほど総斜距離が長くなっており、より小さな傾斜角で長い距離を通るパスが計算されていることがわかる。

一方で、A1：A2パス及びB1：B2パスの最適パス（図6a及び図6b）を、既設林道（図4a及び図4b）

と比較すると、両者の形状は大きく乖離していることがわかる。これはフォワーダによって伐区内を集材走行することを想定した場合には、実際の作業道は地形条件だけで決定されるのではなく、伐区の形状や作業効率を考慮しながら決定されていることによるものである。本研究は、DEMから得られる情報だけで概略作業道の線形を推定したが、井上（1989）のように適切な経由点を空間ネットワークに配置するといった検討が必要である。また、神崎（1974）のように実際の車両走行に関する評価関数をコストに組み込むことにより、計算において車両走行の効率を考慮することも必要である。

図6 推定された作業道の概略線形（制限傾斜角12°）

4. おわりに

本研究は、グラフ理論を利用して概略作業道の線形を自動的に設計する方法について検討した。特に、概略作業道を空間ネットワークと見立て、それを構成するエッジ探索方位と、計算された概略作業道の地形追従性の関係について検討した。その結果、8方位による空間ネットワーク構造では、大分県による制限傾斜角基準で最適パスを計算することができないケースがあることを示した。そして、探索方位を16方位・24方位にすることにより空間ネットワーク構造の地形追従性が高まり、対象地域において、比較的小さな制限傾斜角でも最適パスを計算することができるように確認することができた。

本研究では、概略作業道の最適パス候補を空間ネットワークを表すGISデータとして表現している。したがって、森林資源分布に基づく経由点や既設林道・作業道のGISデータがあれば、それらを空間ネットワークの一部として合成することができる。例えば、洲濱ら（2012）が提案した微地形情報から推定することができる急傾斜地や危険斜面情報など、空間ネットワークを分断する要素を取り入れ、それらを回避する概略作業道を計算することも可能であり、実用的な設計技術として研究が進むことが期待される。

謝 辞

本研究で用いた航空LiDARデータは、林野庁補助事業「平成23年度デジタル森林空間情報利用技術開発

事業」によるものである。記して謝意を表す。

（受付日2013.3.26，受理日2013.7.12）

参考文献

- Dijkstra, E.W., 1959. A note on two problems in connection with graphs, *Numerische Mathematik*, 1, pp.269-271.
- 大分県, 2013. 大分県森林作業道作設指針, <https://www.pref.oita.jp/uploaded/attachment/139368.pdf> (accessed 21 Mar. 2013).
- 井上源基, 1989. トラクタ集材のための集材路網計画法, *林業試験場研究報告*, No. 359, pp.1-126.
- 神崎康一, 1965. 林道網問題に有用なグラフの理論概念と手法, *日本林学会誌*, 47(2), pp.84-87.
- 神崎康一, 1966. グラフの理論による林道網設計法, *日本林学会誌*, 48(10), pp.365-371.
- 神崎康一, 1974. 林道路線選定の数学的方法について, *日本林学会誌*, 56(12), pp.415-424.
- 斎藤仁志, 2012. LiDAR データを用いた林道設計手法と作業道配置手法の開発, *宇大演報*, 第48号, pp.71-110.
- 洲濱智幸, 大萱直花, 2012. Laplacian of Gaussian フィルタによる地形表現手法について, *写真測量とリモートセンシング*, Vol. 51, No. 6, pp.370-374.
- 村井俊二, 大林成行, 篠田 徹, 高橋博将, 1973. メッシュ法による土工量計算の精度に関する研究, *写真測量*, Vol. 12, No. 1, pp.17-22.
- 林野庁, 2010. 森林作業道作設指針の制定について, <http://www.rinya.maff.go.jp/j/seibi/saisei/pdf/sinrinsagyoudou.pdf> (accessed 19 Mar. 2013).