

単一レーザー出力とマルチレーザー出力の LIDAR 装置の比較 仕様の読み方

1」紹介と概要

今日の LIDAR 市場では、各種の航空測量レーザースキャニング装置 (ALS) がオファーされていますが、その仕様書はしばしば読解が困難で、現実の用途に適応しにくいものです。ALS システムの目的は、測定された多数の座標を用いる効率的な方法で地面の地形をキャプチャーする事にあります。仕様書での metrics【数的指標】は、しばしばスキャニングレートや最大作動高度に関してであって、これらだけでは各装置によって作成されるデータの実際の生産性や品質を見抜く事はできません。この複雑さを少しでも分かり易くする為に、生産性とデータ品質を調べる為の簡単な metrics【数的指標】を紹介します。

航空 LIDAR 測量に対する要求として、1 平方メートル当たりの点 (或いは測定) の密度を規定します。しかしながら、この平方メートル当たりの点の metric はデータの実際の品質 (ターゲット周辺の空間的な点分布) についての情報は提供しません。言い換えますと、表面で測定された点の数は、点パターンが均一な場合ならば適切と言えます。不規則な点のパターンが一貫しないサンプリングを生み出し、その為データが情報をあまり提供しないのに対して 完全に均一な点のパターンは表面の信頼できるサンプリングを産出します。

さらに ALS 装置の効率及び生産性が、しばしば装置のパルス繰返しレートとスキャン速度で評価されます。これらの metrics は役立ちますが、システムの実態を表していません。生産性と効率の基本的な metrics は、システムが限られた時間の中でカバーできる全表面です。これら計測速度とデータ品質の 2 つの metrics は、これまで全く扱われていませんでした。この資料の焦点は、これらの方法を通して ALS 装置を評価する簡単な方法を提供し、現実の世界でのシナリオを使ってサンプル比較する事にあります。

特にこの資料は次の問題に回答します。

- 地上で指定した点間隔を確実にしながら、どれほど高速に LIDAR データは収集できるのか?
- 地形の高さ変動は、どれほど収集速度に影響を与えるか?
- 低い最大測定速度を持った装置は、全収集時間に関して高い測定速度の装置を凌ぐことはできるのか?

ALS 装置を特徴付ける時、そのサブシステム、例えばレーザースキャナー (距離計とスキャン機構で構成される)、INS そして航空測量プラットフォーム、に付いて注意深く考慮しなければなりません。この資料では、レーザースキャナー、LIDAR 装置に焦点を合わせています。レーザード距離計に対しては、次のパラメーターを考慮に入れています。

レーザースキャンパルス繰返しレート、測定レート、ビーム広がり角、最長距離及び multiple-time-around(MTA)エコーを正しく解明する能力です。スキャン機構に関しては、スキャンパターン、視野角 (FOV、スキャンスワスの角度幅)、スキャン速度 (例えば、1 秒当たりのスキャンライン数、LPS 及びレーザースキャンビームの角速度) を考慮に入れています。

特別な用途に対して装置の能力を評価する為には、これら全てのパラメーターと、それぞれを単独にとりだした性能の主要部分よりも、それらの相互の影響力を考慮に入れる事が必須事項です。 単一のパラメーターの限界が全システム性能に厳しい制限を押し付け、時には容易に補正できないものになります。

第2章では、3種類のLIDAR装置の性能を次のような方法で比較する方法に言及します。

- 1) 採用しているスキャン機構に注目
- 2) 装置の主要パラメーターを要約
- 3) 技術用語「performance envelope」及び「multiple-time around capability」に付いて説明
- 4) LIDAR装置のサブシステム距離計の性能比較
- 5) スキャナーサブシステム、スキャンパターンの性能に付いて検討
- 6) 地上での点分布を最適化する為の最適スキャンパラメーターを求める簡単な公式を導きだす。

これらの考察は、点間隔とサンプリング周波数を検討する為の基礎を提供してくれます。

第3章と第4章では、シミュレーションで引き出したLIDAR点群の生成と分析について深く追求します。

シミュレーションの方法と作業工程は3種類の典型的なシナリオで記載され、その結果が表示されています。

コリドールマッピング、高密度エリアマッピングそして、山岳地形での広範囲マッピングの3種類です。

第5章では、特にオブジェクト検出及びオブジェクト認識に関する点密度とは対照的な、サンプリング周波数と点間隔の重要性に付いて検討します。

最終章、第6章では、データ収集速度に対するサンプリング周波数（点間隔）として表現するLIDAR装置の分析をします。 どのような一般的な用途においても、特に小高い丘陵や山岳地形でのデータ収集時に、最新のシングルチャンネル266,000測定/秒のLIDAR装置が、最新のデュアルチャンネル500,000測定/秒のLIDAR装置の性能を凌ぐ事をデモンストレーションいたします。

2」性能比較の準備

2. 1 スキャン方法

今日、市場にある主な全ての地形測量ALS装置は、次のスキャン方法の1つに頼っています。

- 回転多面ミラー (即ち、ポリゴンミラー)
- 揺動ミラー

ポリゴンミラーを使用する場合の明らかメリットは、ミラーの連続的でスムーズな回転にあり、これによって地上での真っ直ぐで平行なスキャンラインが得られます。

(図 1.a) 達成できるスキャンレートも高く、地上での均一な点分布を得る為にフレキシブルな調整が可能です。さらに、偏向ミラー面とスキャン機構の低い振動と歪によって、一定で繰返し可能な測定精度を保持することができます。不利な面は、レーザーによって作り出されたパルスの一部が、装置から出ていかないために、測定結果に寄与しない事です。

これと反対なのが揺動ミラー方式で、全てのレーザーパルスが LIDAR 測定に有効です。プラットフォームの移動を考慮に入れると、平らな地面での結果としてのスキャンパターンは、揺動ミラーをどのように電子回路で駆動するかによって標準的な三角形かサイン波形になります。一般的には、地上での測定はミラーの転換点の近くに集中しがちです。(図 1,b) この問題は最新のスキャンコントロール用ハードウェアとファームウェアを採用する事によって緩和されますが、完全に解決される事はありません。

単一のスキャン構造で、2つ以上の距離計（少なくともレーザービーム）を使用する新しいグループの装置があり、これの装置では光学軸がお互いに少しずらしてあります。(図 1.c) これらの2重レーザー出力装置では、各チャンネルが地上にそれぞれのスキャンパターンを作ります。注意深くパラメーターを選択する事によって、少なくとも平坦な地形状況であれば、2つのスキャンパターンの良好な干渉縞を得る事はできます。

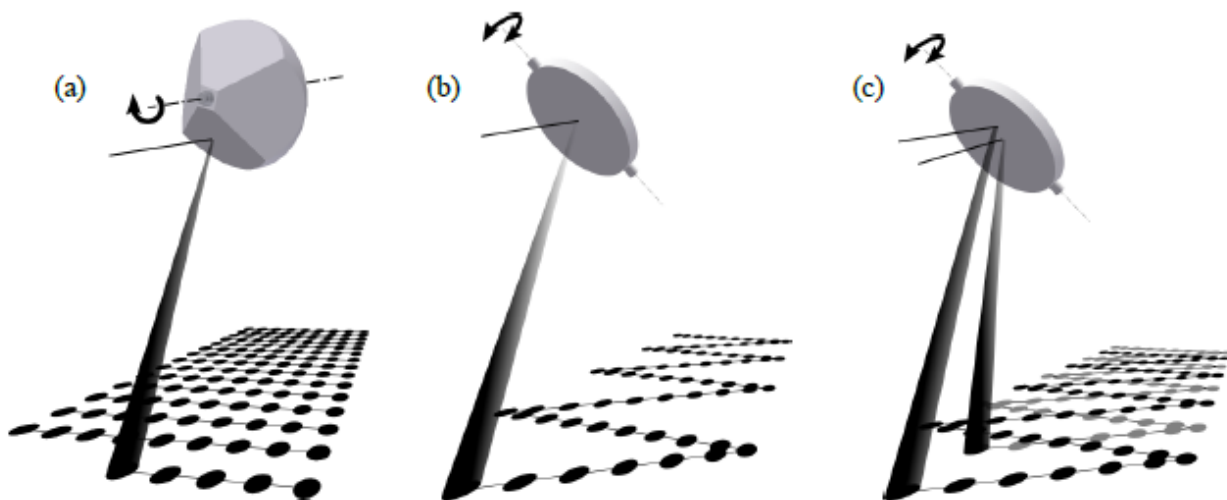


図 1 : レーザースキャニング方式の原理

(a) 回転ポリゴンホイール方式 (b) 1チャンネル揺動ミラー方式 (c) 2チャンネル揺動ミラー方式

2. 2 装置のパラメーター

ここで最新の3台の航空レーザースキャニング装置を評価し、比較してみます。

- 装置A 回転ポリゴンミラー方式 (例えば、RIEGL LMS-Q780)
- 装置B 2重レーザー出力と揺動ミラー方式
- 装置C 揺動ミラー方式を付けた他の2重出力レーザー装置

下の表に、装置A、B、Cの装置パラメーターが表示されています。

	装置A	装置B	装置C
スキャン方式	回転ポリゴン	揺動ミラー	揺動ミラー
チャンネル数	単一チャンネル	2重レーザー出力	2重レーザー出力
飛行高度 AGL ¹⁾	50 m – 3000m	150 m – 3500 m	150 m – 5000 m
レーザーパルスレート	100 kHz – 400 kHz	2 x 40 kHz – 2 x 250 kHz	2 x 50 kHz – 2 x 250 kHz
測定レート	66 kHz – 266 kHz	80 kHz – 500 kHz	100 kHz – 500 kHz
空中におけるパルス数	12パルスまで	2 x 2パルスまで	非公開
測定視野範囲	0度 – 60度	0度 – 75度	0度 – 75度
スキャンレート	10 LPS – 200 LPS	0 LPS – 2 x 200 LPS	0 LPS – 2 x 280 LPS

1) 10%ターゲット反射率、90%検出確率、視野角40度、視界23km

しかしながら、システムパラメーターの全てを無関係に明記できるわけではありません。特に、お互いに強く関連する2組のパラメーターがあります。

- 最大飛行高度 (AGL)、最大レーザーパルスレート (測定レート) と、空中にある複数パルスの処理能力
- 視野角とスキャンレート

最初のパラメーターに付いては、「操作限界」の意味で、次章で説明いたします。

2番目に付いては後で、特定の飛行パラメーターに対して最適な秒当たりのライン数を導き出す時に、より詳細に説明いたします。

2.3 操作限界 (envelope: 航空機の安全運航限界)

性能限界は、意図した地上からの飛行高度に対する、許容最大パルス繰返しレートに関する情報を提供します。下に示した性能限界は、3台の装置に付いて、視野角40度、10%のターゲット反射率に対して90%の検出確率、及び視界23kmを前提にしたものです。性能はLIDAR装置の距離計に直接関連するもので、2重チャンネル装置についても単一チャンネルで示しています。

例えば、装置Aは、400kHzのレーザーパルス繰返しレート (PRR) で2300m AGLまで操作できます。これよりも高い高度では、10%の反射率ターゲットの距離を測定するにはレーザーパルスのパルスエネルギーは弱すぎます。

PRRを低くすれば、パルス当たりのエネルギーが増大し、100kHzのPRRでは3500m AGLまでの測距が可能です。

性能限界は、空中にある多数のパルスを同時に処理するメリットを明確に示しています。この能力によって、高高度からの高速データ収集と言う、装置Aの高い潜在能力を完全に引き出す事ができています。さらに装置Aは、単一飛行スワス内での異なったMTAゾーン内のデータ収集が可能です。反対に装置B及び装置Cでは、スワスの単一スキャンライン内の全てのターゲットが1つのMTAゾーン内に安全に留まるように、適正な飛行計画を確実にしなければなりません。(図3)

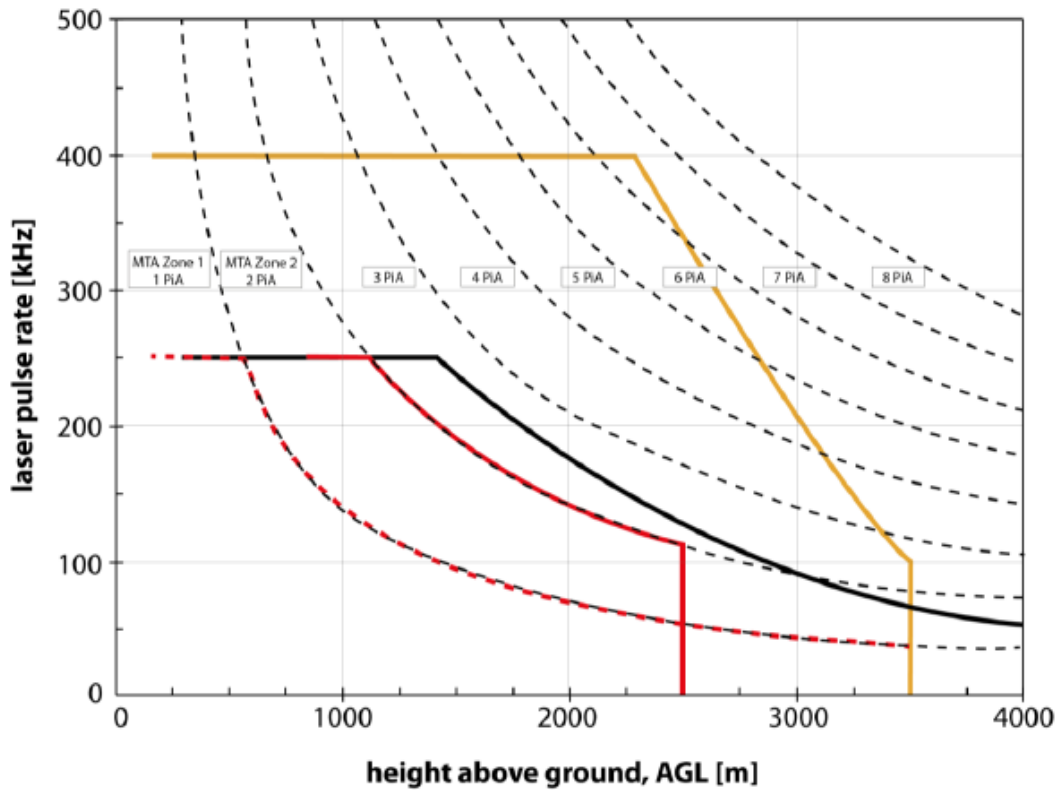


図 2 : 3 台の装置によって得られる性能限界 (単一チャンネル当たり)
 オレンジ色 : 装置 A
 赤色点線 : 装置 B 空中に 1 パルスのみ 赤色実線 : 装置 B 空中に 2 パルス
 黒色実線 : 装置 C 黒色点線は MTA ゾーンの境界を示しています。

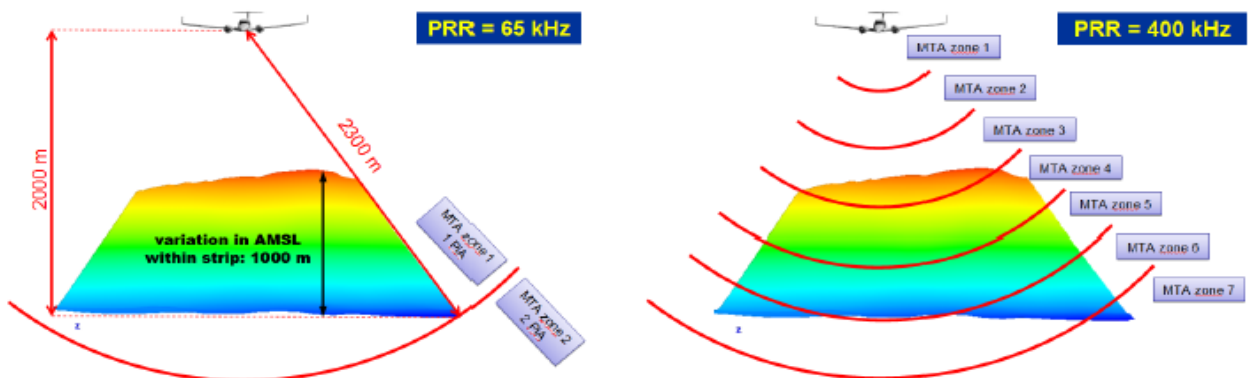


図 3 : 空中の複数パルスと、最大許容レーザーパルス繰返しレートの影響を示しています。
 左側 : 1000m の高度変化のある山岳地形で、飛行スワスの全ターゲットを単一の MTA ゾーンに留まらせる為、PRR は 65 kHz に制限しなければなりません。
 右側 : 装置 A は 1 つ以上の MTA ゾーンで同時にデータ収集ができます。上の例では、ゾーン 3 からゾーン 7 でデータが収集されています。

2.4 スキャナー性能

スキャン方式によっては、視野角（FOV）と1秒当たりのスキャンライン数の間には大きな相互関係があります。

さらに、2重レーザー出力システムは単一の偏向ミラーを使用していますので、地上で達成可能な点間隔に関して、スキャンパターンの干渉影響も考慮しなければなりません。

スキャナー性能に付いてさらに説明するにあたって、測定ビームがスワスの一方の端から、他方の端へ移動する時に単一のスキャンラインを考える事にします。再度、最初は2チャンネル装置の1チャンネルで考察し、干渉については後で取り扱います。

下図は発行されている仕様書に従った、異なった装置の視野角に対する、1秒当たりの最大ライン数（mazLPS）と測定ビームの最大角速度（max $\partial\alpha/\partial t$ ）の依存関係を示しています。装置Aでは（mazLPS）と（max $\partial\alpha/\partial t$ ）の両方がFOVに無関係であり、他の2装置はFOV値が高くなると大きく影響する事に注目すべきです。

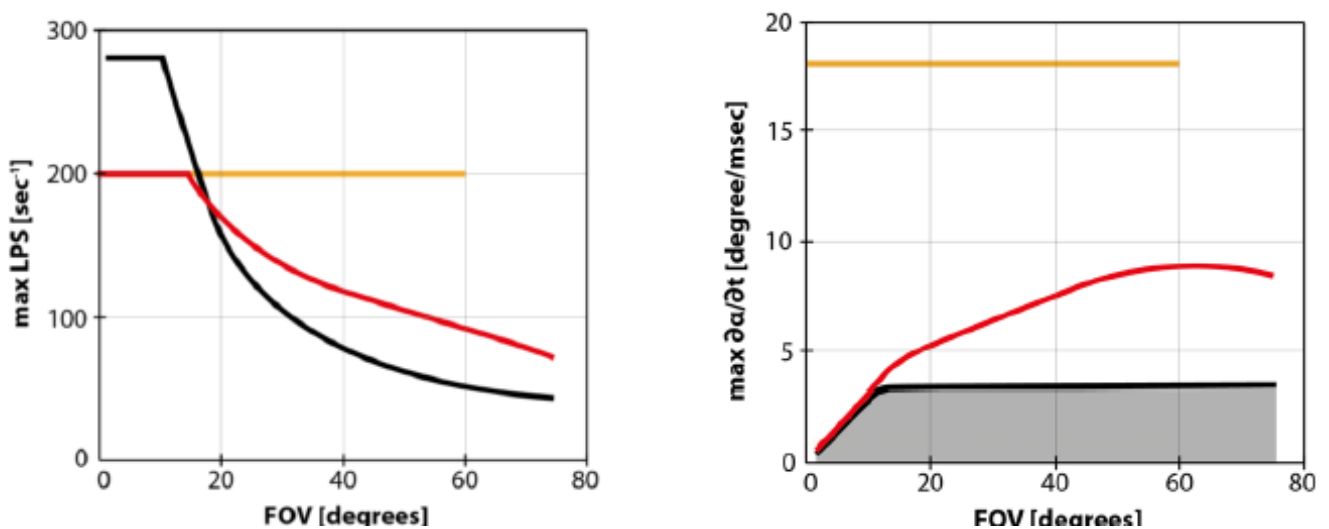


図4： 左側： 視野角に対する1秒当たりの最大ライン数（単一チャンネル）
 オレンジ色：装置A
 赤色：サイン波形スキャンパターンの装置B
 黒色：三角スキャンパターンの装置C
 右側： 視野角に対するレーザービームの最大角速度 色は左側と同一
 灰色部分は、装置Cの角度スキャン速度とFOVの選択可能な範囲を示しています。

図5に示されている通り、1秒当たりのライン数は地上でのライン間隔に直接関連し、角度スキャン速度はスキャンライン内の点間隔に関連します。LIDAR装置の地上での速度を(v)とすると、ライン間隔「b」は単純に「 $b = v / \text{LPS}$ 」です。レーザーショットの角度間隔は「 $\partial\alpha / \text{PRR}$ 」であり、与えられた距離「R」における地上での点間隔「a」は「 $a = R \cdot \partial\alpha / \text{PRR}$ 」（近軸近似）になります。

地上でオーバーラップなしのレーザーのフットプリントにするには、「 $1/e^2$ で0.35 mrad」のビーム広がり角の装置Bは、250 kHzのPRR（最大PRR）に対して「5 deg./ms」の最小角速

度が必要になりますが、この装置は最大で「3 deg/ms」しかありません。このように装置Bは最大のPRRでオーバーラップ無しのフットプリントの測定ができません。

小さいFOVで1秒当たり高いライン数は、幾つかの特別な用途で有利な場合があります。残念ながら、ミラーが各ライン毎に反対方向へ加速する前にFOVの端で停止しなければなりませんので、小さいFOVで高い角速度にはなりません。この反対方向への加速が生じる領域では、地上で離れているフットプリントが非常に複雑になります。

ほとんどのLIDAR用途において、地形は地上での最大許容点間隔でサンプリングされなければなりません。（地形のサンプリングについては後述いたします。）

従って、全てのパラメーター（AGL、地上での速度、PRR、LPS）を、ライン間隔とライン内の点間隔が等しくなるように調整しようとするのが一般的な方法です。図6には各装置にとって最適な1秒当たりのライン数を計算する方程式とともにスキャンパターンが示されています。装置Aのマトリックススキャンパターンと装置Cの三角スキャンパターンでは、スワスの端での間隔「a」がスワス中央での間隔「b」と等しくなければなりません。ところが装置Bのサイン波スキャンパターンでは、間隔「a」がスワス中央だけで得られるのです。この計算の為に我々は、スワスの端でのギャップを埋める為に装置B及び装置Cの2チャンネルから地上での2つのスキャンパターンの最適な干渉を考慮しています。単一チャンネルのスキャンパターンでは、端でのライン間隔は「2b」である事に注意して下さい。大きなFOVに対して、揺動ミラースカナーの遅い最大スキャン速度の為に、方程式に応じたLPSの最適数は、幾つかのパラメーターセットに対して達成できません。

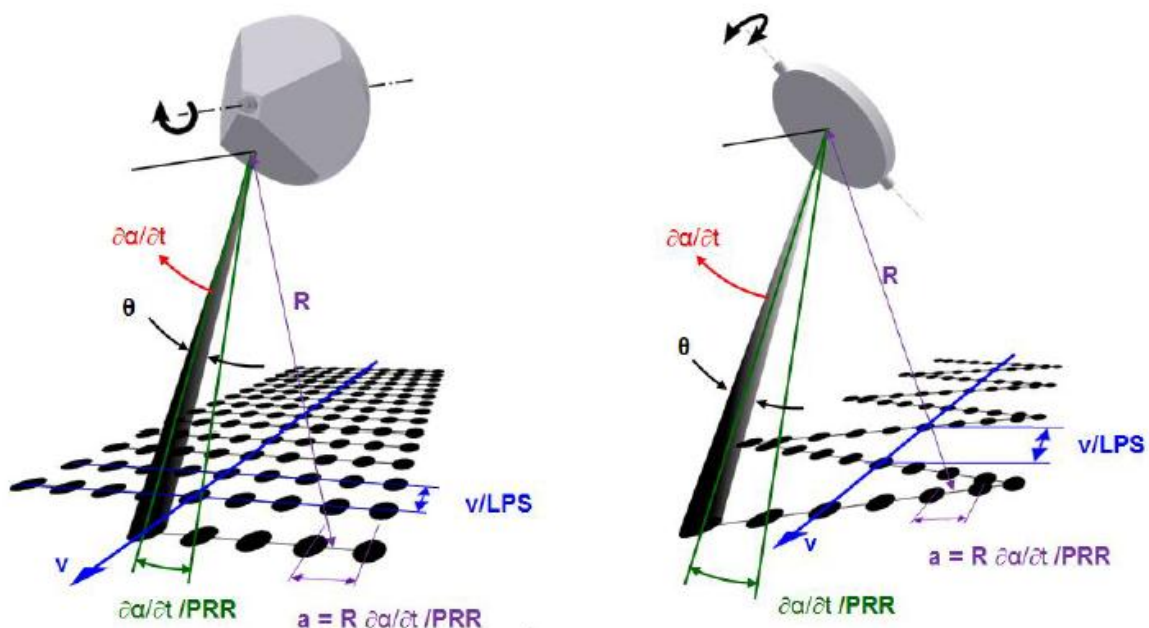


図5： ポリゴンミラースカナー（右側）と揺動ミラースカナー（左側）の地上でのスキャンライン内の点間隔「a」とライン間隔「b」。

v： プラットフォームの速度

LPS： 1秒当たりのライン数

PRR： レーザーパルス繰返しレート

$\partial\alpha/\partial t$ ： 測定ビーム角速度

Θ ： ビーム広がり角

R： 距離

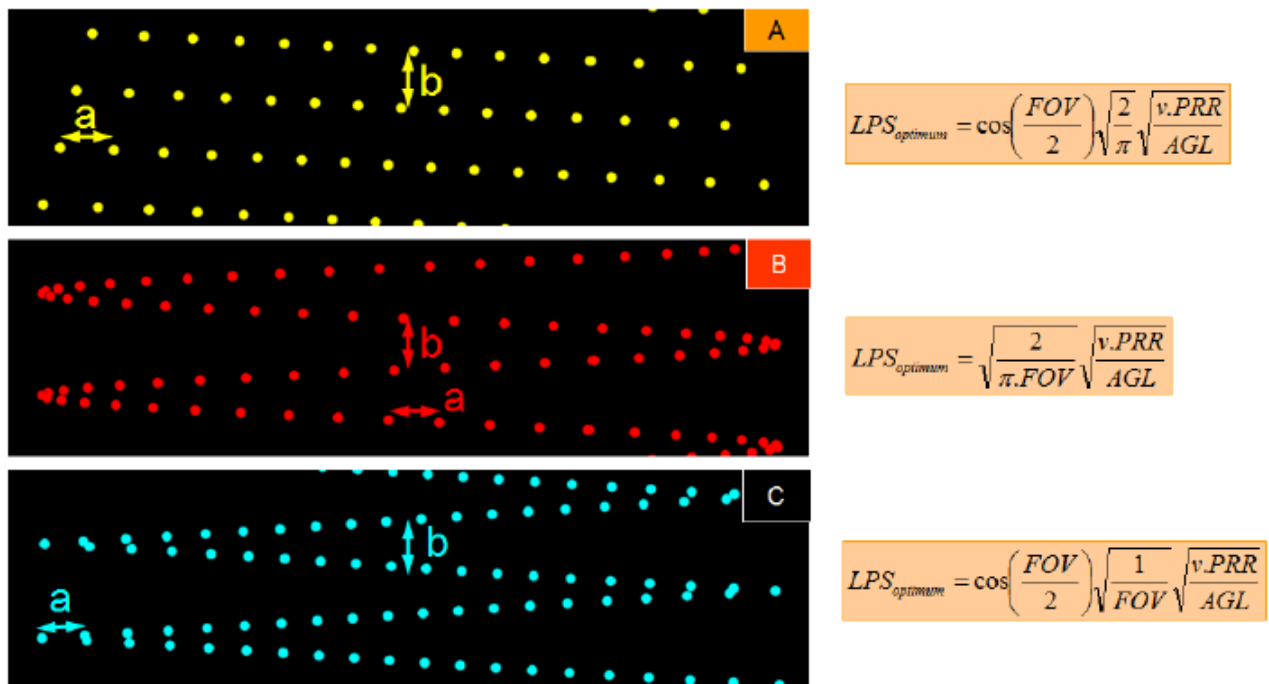


図6： 左側： 装置A（上）のスキャンパターン及び装置B（中央）と装置C（下）の単一チャンネルのスキャンパターン。
 右側： 1秒当たりのライン数の最適選択の為の方程式。 装置Aの方程式は、4面ポリゴンミラーに対して有効です。

2重チャンネルの装置は、同時に少し異なった方向で距離測定を実施します。 両チャンネルが一つの揺動ミラーで偏向されますので、2つのビームは飛行方向が角度的に離れます。各チャンネルが地上にそれぞれのスキャンパターンを作り出し、下図に示すように、2つのスキャンパターンが望ましい干渉になるように工夫されます。 2つのスキャンパターン間の位相は、地上での速度、地上からの高度及び1秒当たりのライン数に依存します。平坦な地形では、アクティブな制御ループによって望ましい「out-of-phase 位相の異なった」状況が確保されますが、山岳地形や丘陵地形に対しては、どのような対策の可能性もないまま望ましい干渉が、好ましくない状況になってしまいます。

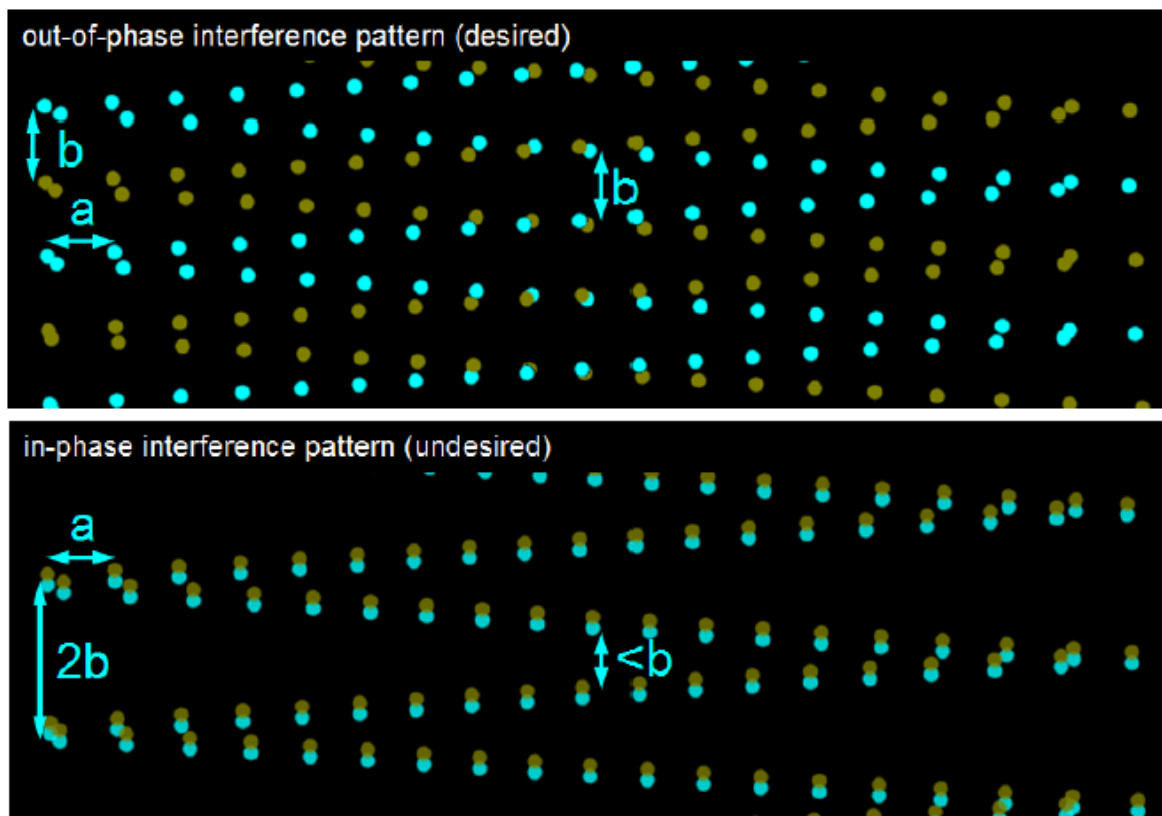


図 7 : 2重レーザー出力システムの干渉パターン。
 チャンネルのスキャンパターンを異なった色で表示しています。
 上 : 好ましい「out-of-phase」の干渉パターン。
 下 : 好ましくない「out-of-phase」の干渉パターンで、端では「 $2b$ 」のライン間隔になっています。

2.5 点間隔と点密度

LIDAR データは連続的に収集されます。即ち、単一レーザー出力の LIDAR 装置では 1 測定毎、2 重レーザー出力装置では同時に 2 測定が繰り返されます。いずれの場合でも点間隔を問題にする時、実際の測定がスキャンラインに整理されていると好都合です。そこで全スキャンパターンは多数のスキャンラインで構成される事になります。ターゲット面上の測定はスキャンラインに沿って、「 a 」で表される間隔を持ちます。スキャンライン自身はお互いに「 b 」で表される特定の間隔を持ちます。飛行方向に沿って連続するスキャンラインの距離は、揺動スキャンミラーのスワ幅全体で、特にスワスの端に近い場所で大きく変化します。(前のセクションのスケッチでも比較できます。)

飛行計画は、公称点間隔 (NPS) か、通常 1 平方メートル当たりの点で測定される (「点数/エリア基準」と同様) 点密度のどちらかを基準にするのが一般的な方法です。「LIDAR Guidelines and Base Specification“, [3]」は、項目の厳密な定義をすることなしに「公称点間隔 nominal point spacing」の項目を述べています。

「ASPRS スタンダード“LIDAR density and spacing specificatio“, [4]」の原案では、2つの基準を定義しており、それらは ALS 点群の後収集と後処理品質コントロール用の統計的基準として、LDSS 点間隔と LDSS 点密度です。

次の考察には、ASPRS の後部基準点間隔から離れて、平均値を使う代わりに、点に繋がっている全エッジの最大値として最悪のケースの NPS（公称点間隔）を使用します。これによって確実に地上でのサンプリングのギャップが最悪のケースで計上され、非常に高密度の為、或いは単一スキャンライン内で測定がオーバーラップする事によって削減されません。

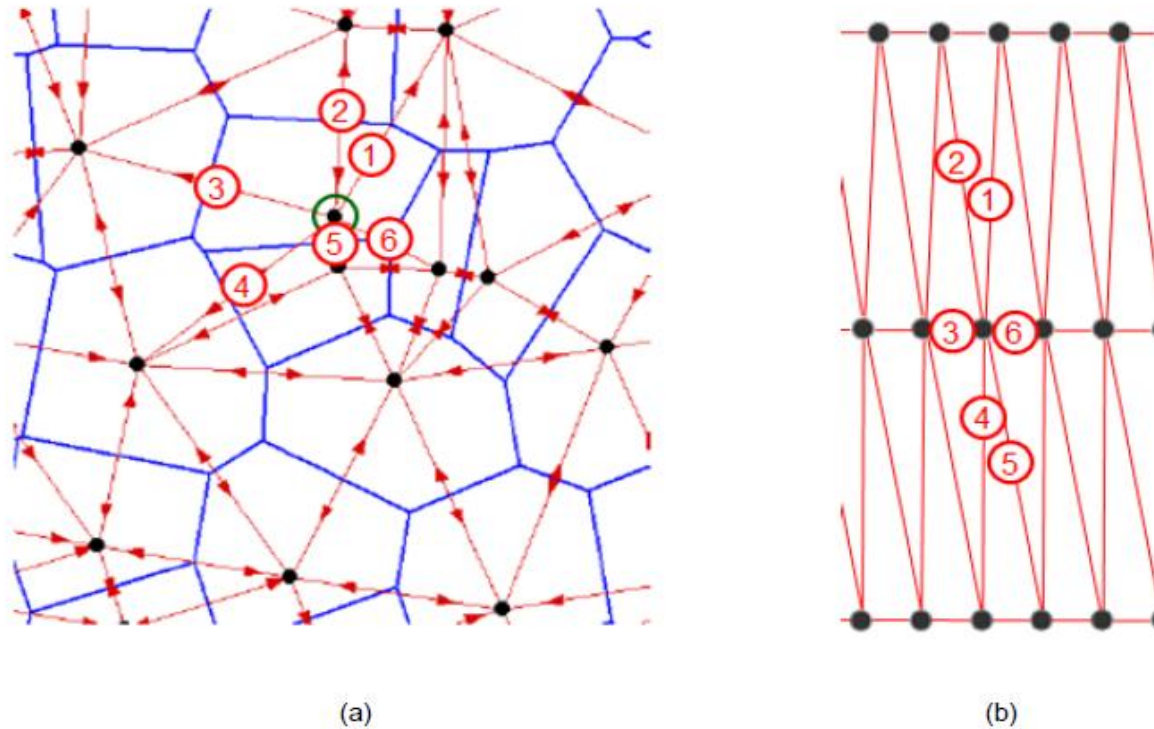


図 8 : 黒い点のそれぞれは、地上での測定を表しています。
赤い線は「ドローネー三角分割法」に従った三角の辺です。
青のポリラインは「Voronoi cells」を示しています。
(a) : 不規則に分布した点。例は資料[5]からとられています。
(b) : 長いスキャンライン間とスキャンラインに沿って短い間隔の規則的なスキャンパターン

対称性を持たせる為に、通常は「点/m²」で与えられる点密度と同様の基準にする公称点間隔の逆数(1/NPS)を使います。

従って 2つの基準は：

- メーター当たりの点で測定された公称サンプリング周波数、これは NPS の逆数
例えば、「2 点/m」のサンプリング周波数は「0.5m」の公称点間隔に相当します。
- 平方メートル当たりの点で測定された公称点密度、即ち、あるテスト領域の点の数をその領域の面積で割ったもの。

これより先に立証されるように、オブジェクト検出、表面再構築、モデリング等々の時に実際に考慮するのは、公称サンプリング周波数です。

3」シミュレーションからの LIDAR 点群

3種類の装置が達成できる性能を比較する為に、装置のそれぞれに対する簡単な数学モデルを導入して、装置をその最適なパラメーターで地形モデルの上を飛ばせました。下図は左側に作業工程を、右側に相互依存性を示しています。

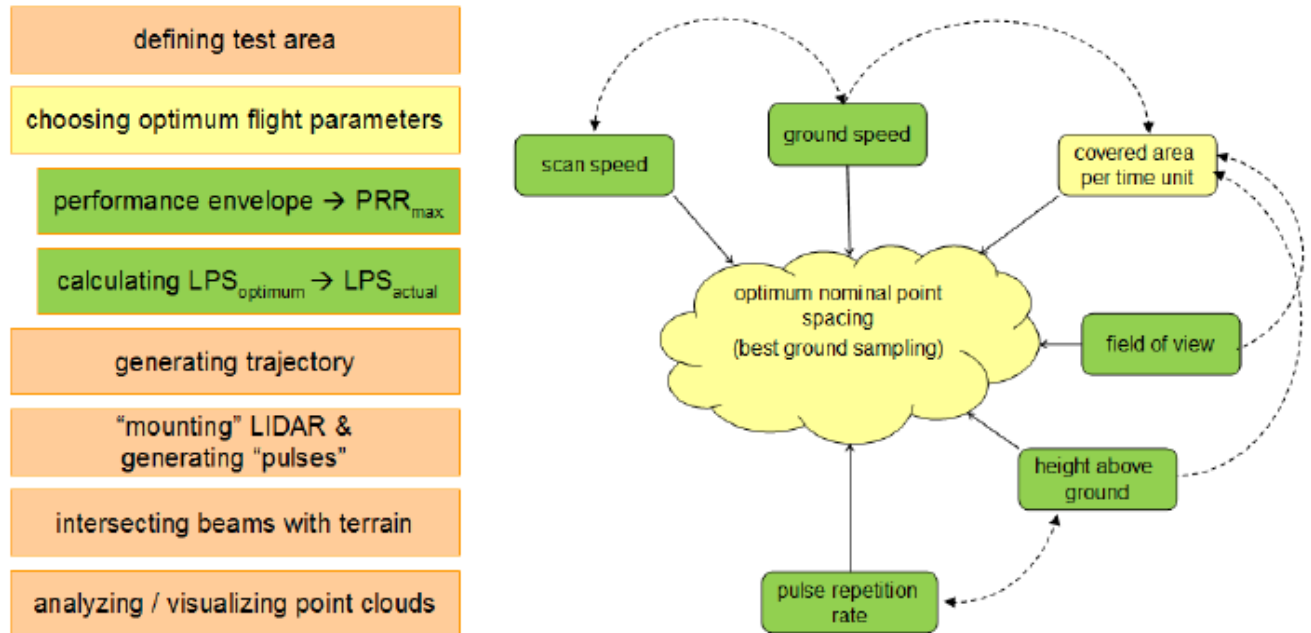


図9： 左側： 代表的な点群をシミュレーションする為の作業工程
 右側： 収集速度とサンプリング周波数（公称点間隔の逆数）に影響するパラメーターの相互依存性

最初にテストエリアと地形の高低差を決めます。地形には NASA SRTM データを使用しました。最も高速な地上でのサンプリング周波数、即ち最も小さな公称点間隔(NPS)を保ちながら、最も高速でのデータ収集速度、即ち単位時間当たりでもっと広いカバーエリア、通常は「km²/h」を達成する為の最適な飛行パラメーターが選択されます。

しかし2つの基準は、地上での速度、測定視野角、飛行高度、レーザーパルス繰返しレートとスキャン速度などのパラメーターに影響をうけ、さらに特定の装置によってはこれらのパラメーターに課せられている限界に影響を受けます。

次のステップは選択されたAGLに応じたトラジェクトリーを生成し、地上を選択された速度で巡航する仮想航空機にLIDARを取り付け、パルス、即ち空間での測定ビームと地形モデルとの交差、を発生させます。

これによって、以降の分析や可視化に使用される点群ができます。

4」性能比較

続いて、異なったシナリオと3種類の装置に付いて、典型的な測量条件のもとでの点密度、点間隔及び点分布を調査します。下表は主要パラメーターの要約です。

	シナリオ1	シナリオ2	シナリオ3
用途	コリドールマッピング	高密度測量	広範囲マッピング
地形	平坦	平坦	山岳地形
AGL	500 m	1000 m	1000 m – 2000 m
速度	60 kn	120 kn	140 kn
測定視野角 FOV	60 deg.	60 deg.	60 deg.

シナリオ1：典型的な60 knの速度で500 m(1500 ft)AGLの飛行路での回転翼航空機からの典型的なコリドールマッピング用途を示しています。

シナリオ2：単発固定翼機で1000 m(3000 ft)AGL飛行路からの典型的な高密度測量を表現しています。

シナリオ3：単一飛行スワス内に大きな高さ変動のある山岳地域のような、最も興味深いデータ収集を扱います。

図10は、シミュレーションに用いられる地形モデル、平坦な領域と山岳領域を示しています。

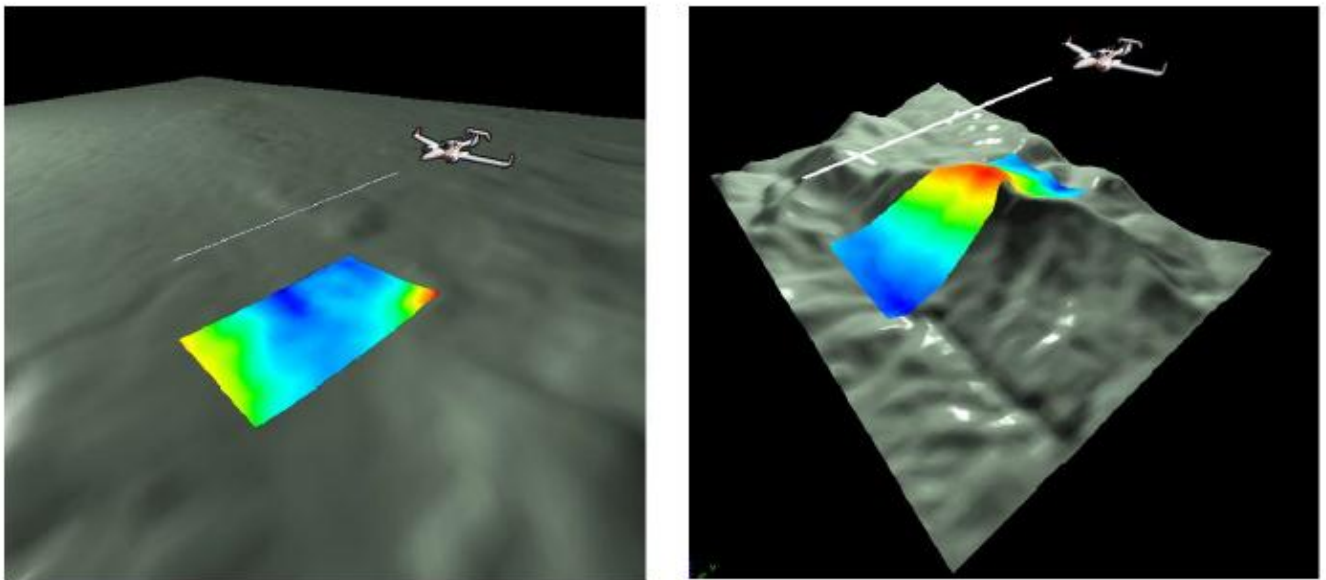


図10：シミュレーションに使用された地形モデル。高さでエンコードした装置Aの点群を重ねてあります。

左側：シナリオ1及び2で使用された高度変化60 m

右側：シナリオ3で使用された単一飛行ライン内の高度変化1000 m

4. 1 コリドールマッピング

コリドールマッピングは、送電線マッピングとエリアマッピングと言う2つのカテゴリーにさらに分割する事ができます。送電線マッピングでは、電力ラインの電線をマッピングする為に、通常はスキャンライン内での高密度のサンプリングが達成できるように装置のパラメーターを設定します。これは、各ラインで連続するレーザーフットプリント間にギャップが無いように、遅いスキャン速度にする事で達成されます。

下表は送電線マッピング用の3種類の装置の作動パラメーターを示しています。図11はシミュレーションに応じたフットプリントの実際の分布を示しています。各フットプリントのサイズは、既定されているビーム広がり角（必要ならば「 $1/e^2$ 」値に変換）と距離から計算されています。

	AGL	FOV	measurement rate	LPS	point spacing a	line spacing b	avg. point density
Instrument A	500 m	60 deg	1x 266 kHz	1x 55 LPS	0.11 m	0.45 m	16.5 p/m ²
Instrument B	500 m	60 deg	2x 245 kHz	2x 41 LPS	0.14 m	0.76 m	30.2 p/m ²
Instrument C	500 m	60 deg	2x 244 kHz	2x 53 LPS	0.15 m	0.58 m	30.2 p/m ²

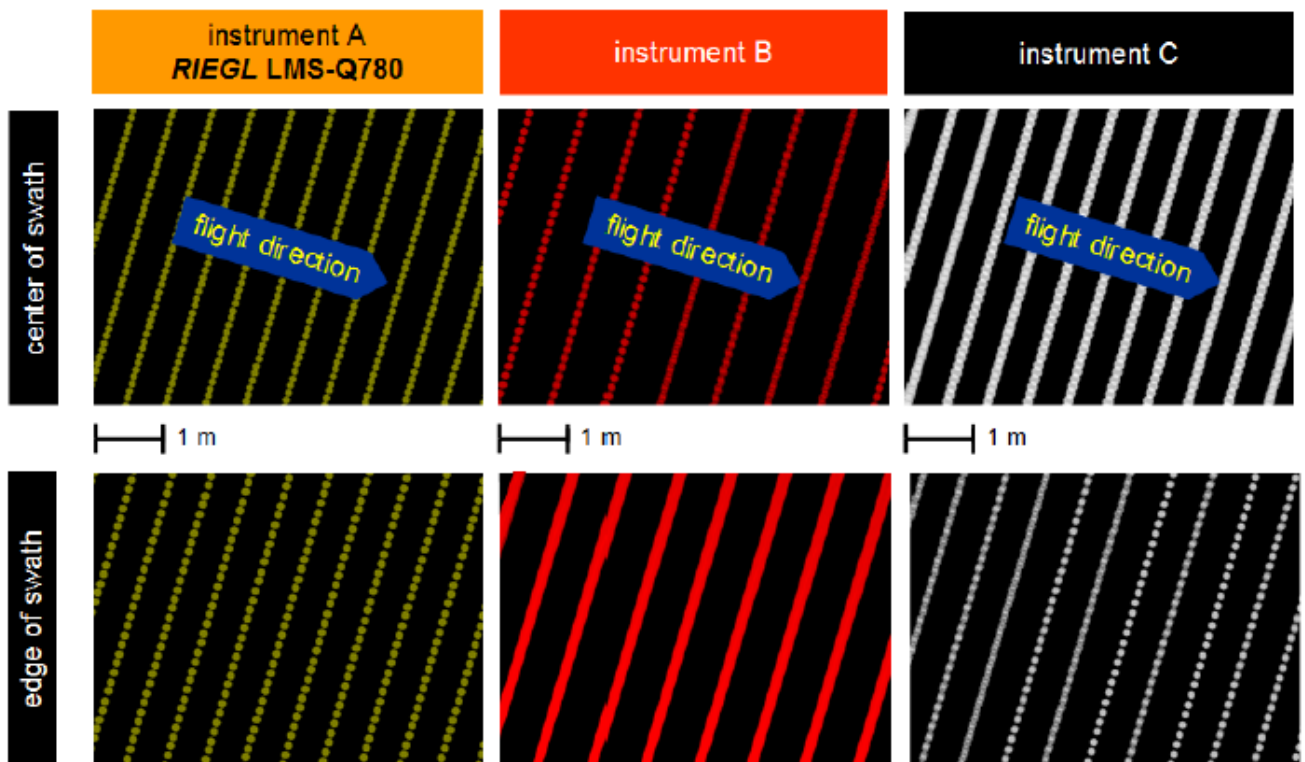


図11： シナリオ1に対するレーザーフットプリントの分布；送電線マッピング用に最適化

2番目のカテゴリでは飛行方向と、それを横切る方向の両方向に、等しくレーザーフットプリントを分布させる事が最も重要です。マトリックススキャンパターンの装置Aはこの問題を容易に達成でき、装置Bもほぼ同じサンプリングが達成できます。装置Cの場合は、スキャン速度の限界に対処する為に飛行高度を高くする必要があります。点間隔は装置Aとほぼ同じですが、地上でのフットプリントを調べると、フットプリントが重なっている為に測定が独立していない事がわかります。(図12と比較)

	AGL	FOV	measurement rate	LPS	point spacing a	line spacing b	avg. point density
instrument A	500 m	60 deg	1x 266 kHz	1x 109 LPS	0.28 m	0.28 m	16.5 p/m ²
instrument B	500 m	60 deg	2x 245 kHz	2x 93 LPS	0.32 m	0.33 m	30.2 p/m ²
instrument C	1300 m	25 deg	2x 250 kHz	2x 114 LPS	0.27 m	0.27 m	30.2 p/m ²

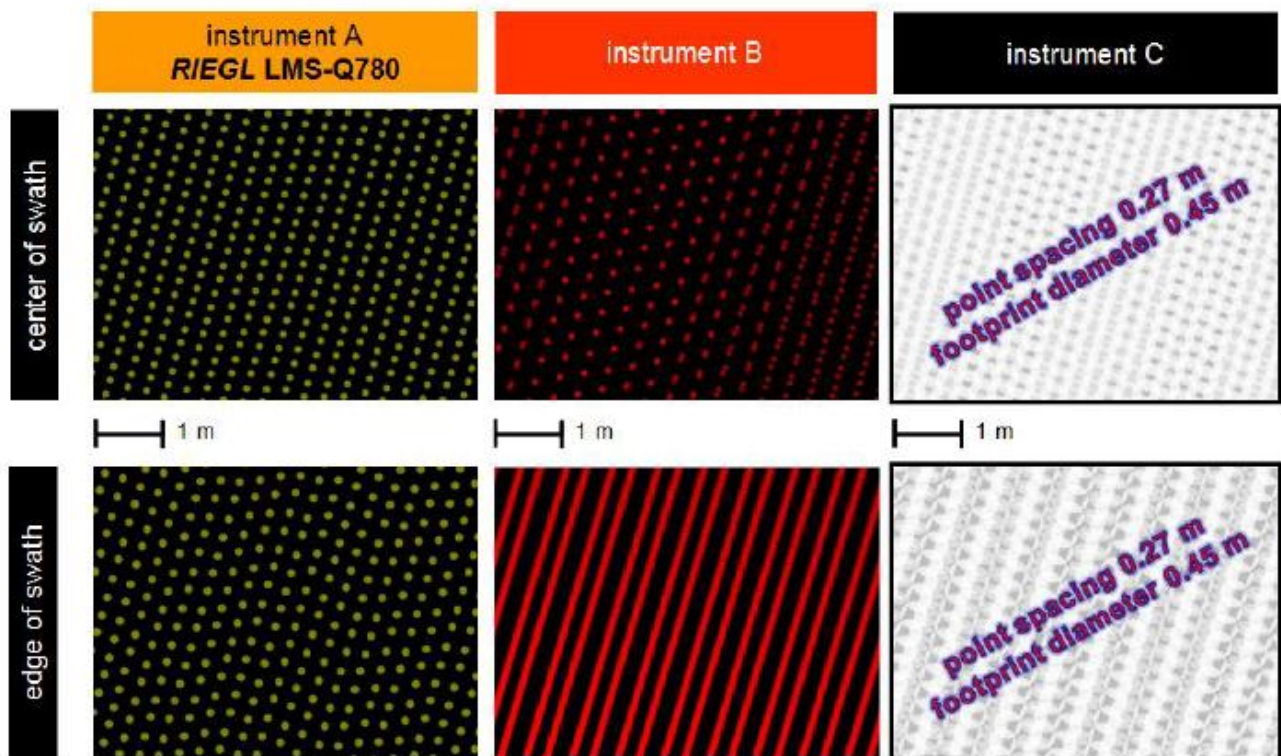


図12： シナリオ1でエリアマッピング用に最適化されたレーザーフットプリントの分布

4.2 高密度広範囲測量

地上 3000 ft の固定翼機からの広範囲の高密度測量は、1500 ft からのエリア測量と比べて非常に似通っています。両水平方向に均一な分布を達成する為には、装置Cはより高いスキャン速度にする為に FOV を小さくして、より高い高度から操作しなければなりません。ここでも装置Aは最良の地上でのサンプリングを得る事ができます。地上で 500 kHz の測定レートで作動する装置Bに比べて、装置Aは 266 kHz の測定しかできないのですが、装置B

はエッジ部及び天頂部に近いオーバーラップ領域で多数の測定を「wasted 無駄に」しており、それらは良好な地上サンプリングに寄与していません。

	AGL	FOV	measurement rate	LPS	point spacing a	line spacing b	avg. point density
instrument A	1000 m	60 deg	1x 266 kHz	1x 108 LPS	0.57 m	0.57 m	4.1 p/m ²
instrument B	1000 m	60 deg	2x 250 kHz	2x 93 LPS	0.61 m	0.66 m	7.7 p/m ²
instrument C	1900 m	34deg	2x 180 kHz	2x 94 LPS	0.65 m	0.66 m	5.5 p/m ²

下図も地上でのレーザーフットプリントの分布を表しています。飛行方向は vertical です。少しオーバーラップしている装置Cのフットプリントに注目して下さい。

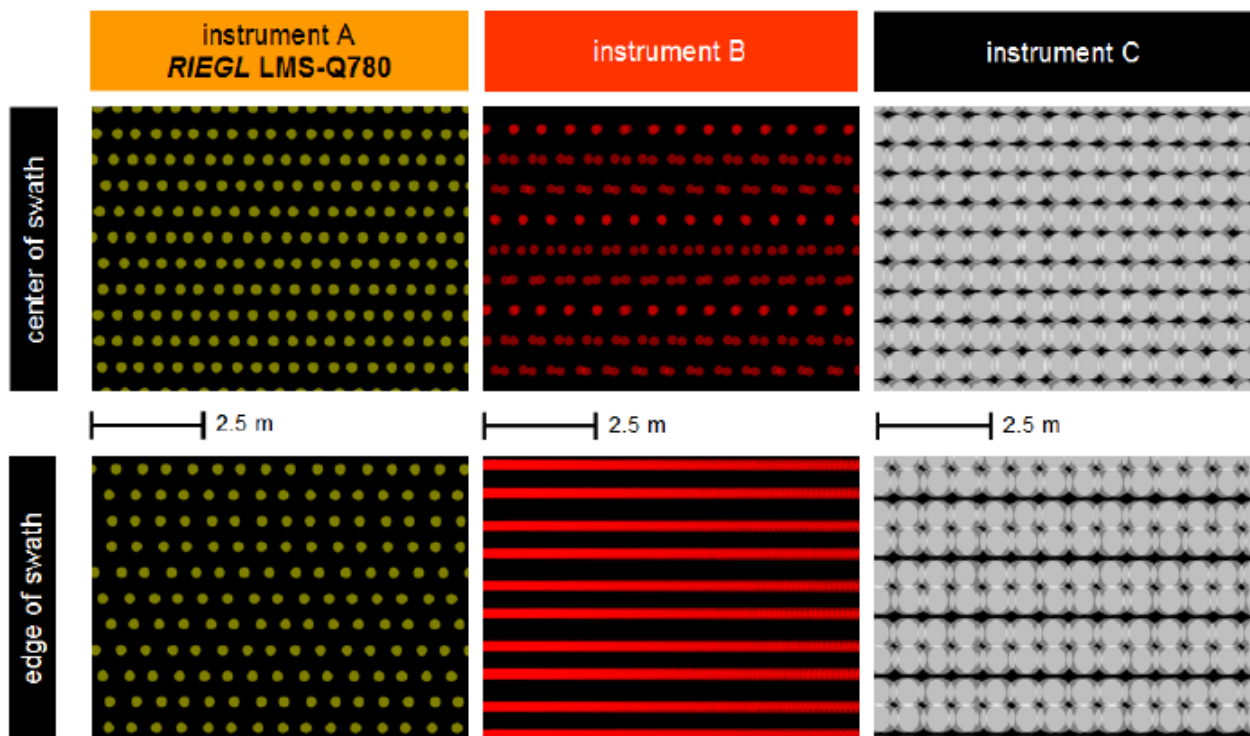


図 13： シナリオ2のレーザーフットプリントの分布

4. 3 山岳地帯での LIDAR データ収集

山岳地帯での LIDAR データ収集は、一般的に困難な課題です。地形の高さの変化に応じてスワ幅も変化します。

山岳地帯で高密度データを得る一般的な方法は、かなり狭いスワ幅で操作して、地形を追いかける事です。しかし、これは「km²/h」で測定されるデータ収集速度を大幅に減少させ、その結果、データ収集をより高価にしてしまいます。

単一スワ幅内の異なった MTA ゾーンでデータ収集ができる装置Aの能力が別のアプローチを可能にします。即ち、固定翼機で高高度飛行です。これが最も時間効率の良い、そして費用効率のよいアプローチをもたらします。

次のシミュレーションはこのアプローチを踏まえたものです。 地上の追従を試みることに無しに、地形の上 1000 m から 2000 m (1000 m の高度変化) 間の AGL 値を飛行して作り出した点群には、3 種類の装置で非常に違いのあるサンプリング品質が見られます。

山岳地帯や丘陵地帯は、2 重レーザー出力装置にとって特に困難な場所です。 それは、単一スキャンライン内で AGL が非常に大きく変化する為に、2 チャンネルのスキャンパターンに対する意図した「out-of-phase」状況を維持する事ができないからです。

さらに、全てのオブジェクトが確実に単一の MTA ゾーン内にあるようにするには、装置 B 及び C のパルス繰返しレート、従って測定レートを大幅に減少させなければなりません。

下表は達成できる点間隔の要約で、図 1 4 は天頂とスワスのエッジでのレーザーフットプリントの分布です。 スワスのエッジでは 2 種類の分布が表示されています。 ベストケースは良好な「out-of-phase」干渉を考慮したもので、ワーストケースは好ましくない、そして不可避な「in-phase」の状況を写し出しています。

	AGL	FOV	measurement rate	LPS	point spacing a	line spacing b	avg. point density
Instrument A	2000 m	60 deg	1x 266 kHz	1x 83 LPS	0.87 m	0.87 m	1.3 - 3.5 p/m ²
Instrument B	2000 m	60 deg	2x 63 kHz	2x 37 LPS	1.94 m	4.32 m	0.53 - 1.9 p/m ²
Instrument C	2000 m	60 deg	2x 66 kHz	2x 41 LPS	1.74 m	3.50 m	0.9 - 2.6 p/m ²

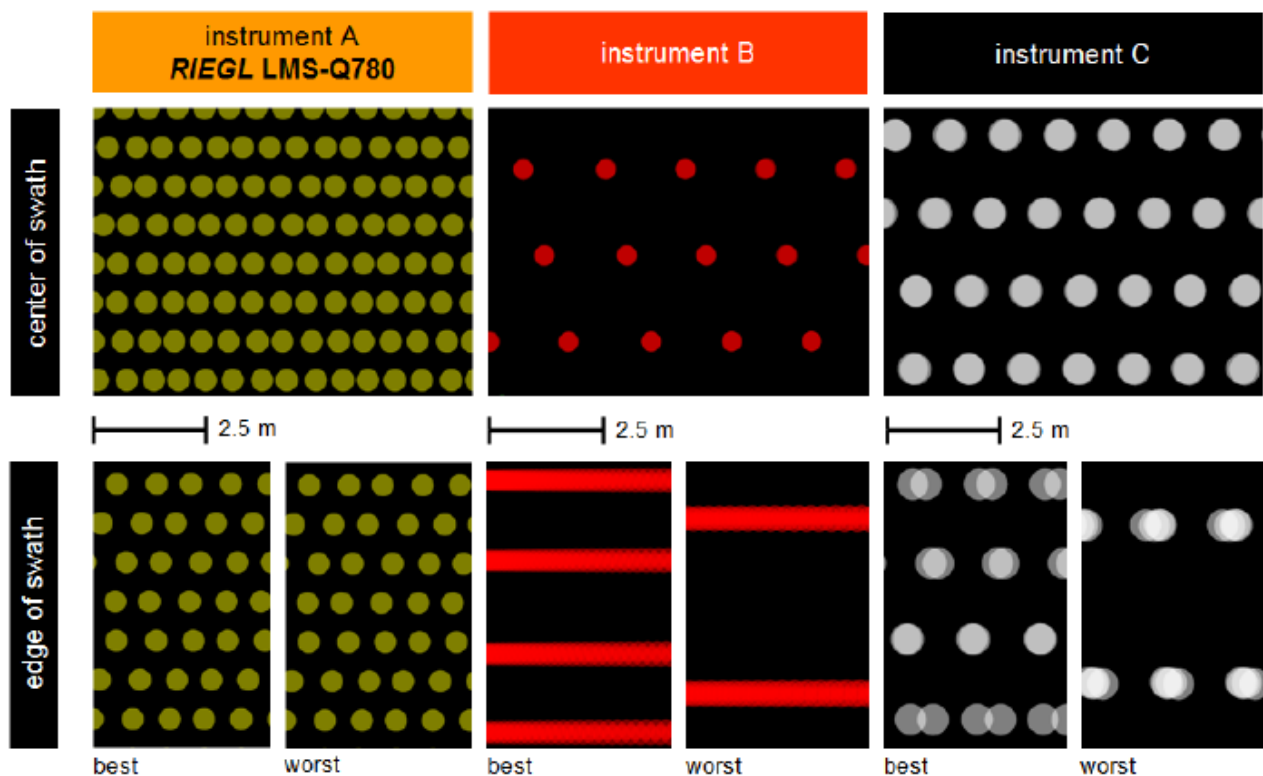


図 1 4 : シナリオ 3 のレーザーフットプリントの分布

5」レーザーフットプリントでの地形のサンプリング

公称点間隔（NPS）、従って特定のスキャンパターンのサンプリング周波数の多大な重要性を実証する為に、各装置用に生成されたスワスのエッジ近くで、山岳地帯の地形の上に人口物体を置きました。読者に表示に慣れてもらう為に実例を図15に表示しました。上からみた点群で、高さでカラーコード化されています。青色のフットプリントは、小さな家の周りの低地に当たり、赤色のフットプリントは屋根に位置しています。点群を透視図にするとオブジェクトがより容易に認識できます。

図16はスワスのエッジで収集したシナリオ3の点群をシミュレートしたものです。カラーコードは図15で使用した物と同様です。レーザーフットプリントは、低いターゲット面に当たった時は青色に、高い場所のターゲット面に当たった時は赤色にコード化されます。サンプリング原理に従えば、オブジェクトを再構築でき、或いは少なくともオブジェクトの再認識/検出ルーチンを実行する為には、サンプリング周波数はサンプリングされるべきオブジェクトの最大空間周波数の少なくとも2倍なければなりません。そうであっても、1平方メートル当たりの点数で測定された点密度は、多かれ少なかれ3種類の全装置で同じです。

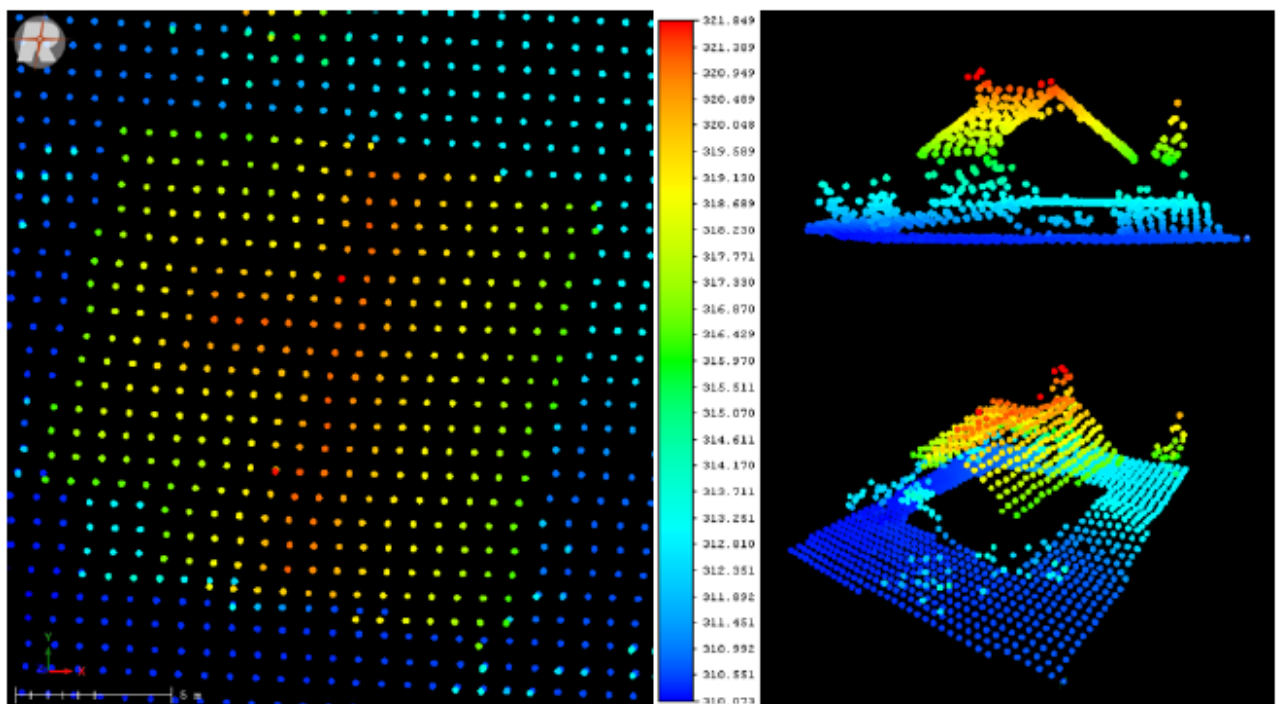


図15： 装置Aでサンプリングされたオブジェクトの現実の例。
 左側： 高さでカラーコード化（青色：低い・赤色：高い）点群の上面図
 右側： 同じ点群の透視図

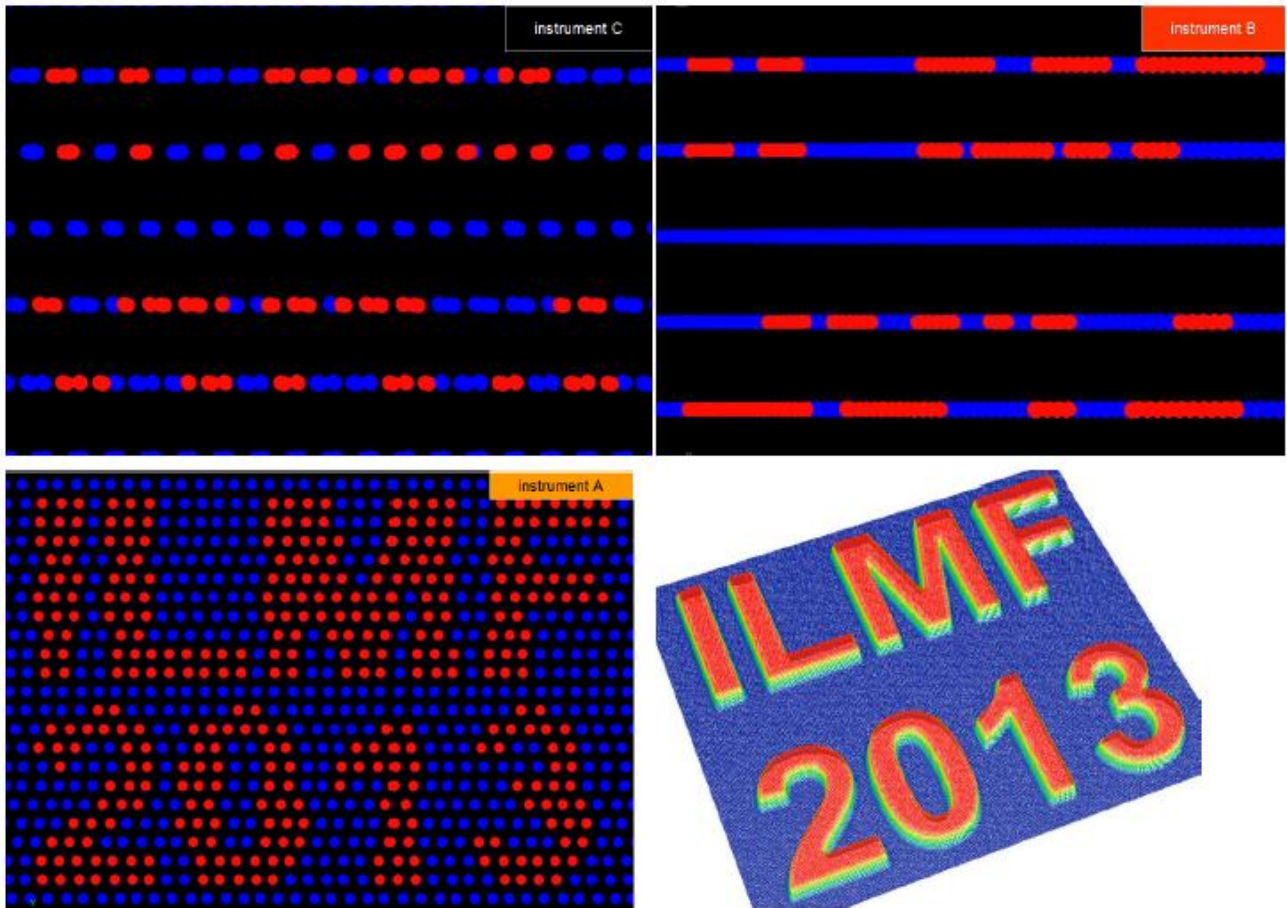


図 1 6 : シナリオ 3 用に生成された点群による人工物体 (右下) のサンプリング。
左上 : 装置 C によるサンプリング
右上 : 装置 B によるサンプリング
左下 : 装置 A によるサンプリング

6」収集速度

「指定したサンプリング品質を確保しながら、特定の装置をつかってどれほど早く LIDAR データの収集ができるのですか？」の質問に答える為に、「点/m」単位のサンプリング周波数のプロットを作成しました。即ち、時間当たりの平方キロメートルで測定された収集速度に対する公称点間隔の逆数です。

収集速度は地上速度とスワ幅で簡単に計算されます。収集速度は通常、1時間当たりの平方キロメートルの単位で表現され、一般的に使用されるスワスのオーバーラップを考慮にいない単一スワスでカバーされるエリアを踏まえています。我々は、各メーカーの推奨に従って、装置B及び装置Cについてスワスのエッジ付近（即ち、揺動ミラーの反転付近）にある全ての測定を放棄する一般的な方法に従います。

下図は装置Aのそのような図を示しています。例えば、1メートル当たり4測定（0.25m以上上好な公称点間隔）で全スワ幅全体にわたってサンプリング周波数を達成しなければならない場合、最大収集速度は「33 km²/h」です。装置Aでは、同じ収集速度が、使用される航空機の能力で採用できる広範囲の中の異なった高度と異なった速度からでも達成する事ができるのです。この図はまた、高いサンプリング周波数（低い公称点間隔）でのデータ収集は低い収集速度を要求するという一般的な傾向も映し出しています。

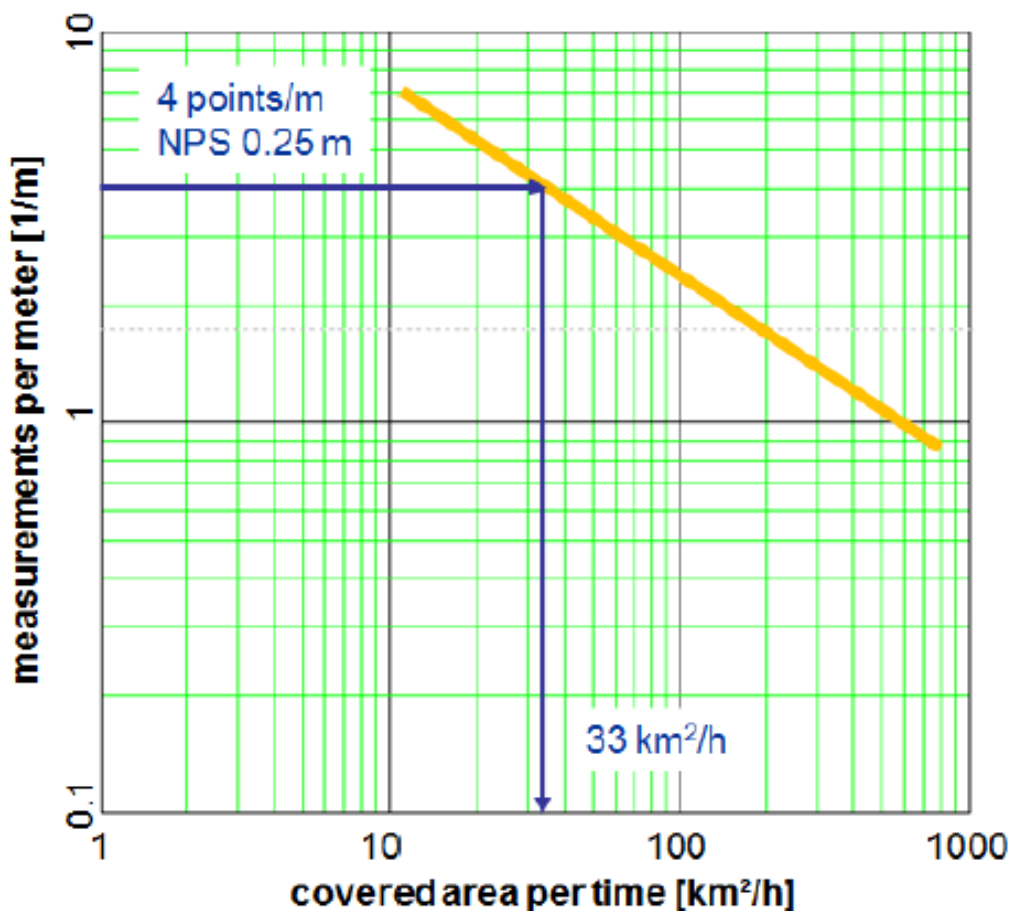


図 1 7 : 装置Aの収集速度 対 サンプリング周波数。 図の読み方を青色で示しています。

6. 1 平坦地形での収集速度の比較

図 1 8 は、装置 A と装置 B における収集速度対サンプリング周波数の性能を示しています。明快にする為に次の図には装置 C の性能を入れていません。装置 B の性能よりも少し悪くなっています。

「20 km²/h」から「200 km²/h」の領域では装置 A と装置 B の差は小さいです。しかしながら、毎秒 266,000 測定の装置は、10%優れた点間隔で出力し、20%高速なデータ収集を行える事によって、毎秒 500,000 測定の装置より優れた性能になっています。「200 km²/h」を超える収集速度の領域では、地上からより高い高度での収集が要求されますが、装置 B は単一の MTA ゾーンでのデータ収集しかできず、その為に装置 A と比べてさらにサンプリング周波数と収集速度を低くしますので、最大レーザー繰返しレートを落とす事になります。「600 km²/h」の領域で装置 A は、点間隔で 60%、収集速度で 2 倍、装置 B の性能を上回っています。図の左側では、非常に高いサンプリング周波数（1 メーター当たり 4 点）で、揺動ミラースキャナーによる限界が装置 A よりも性能の差を増大させています。

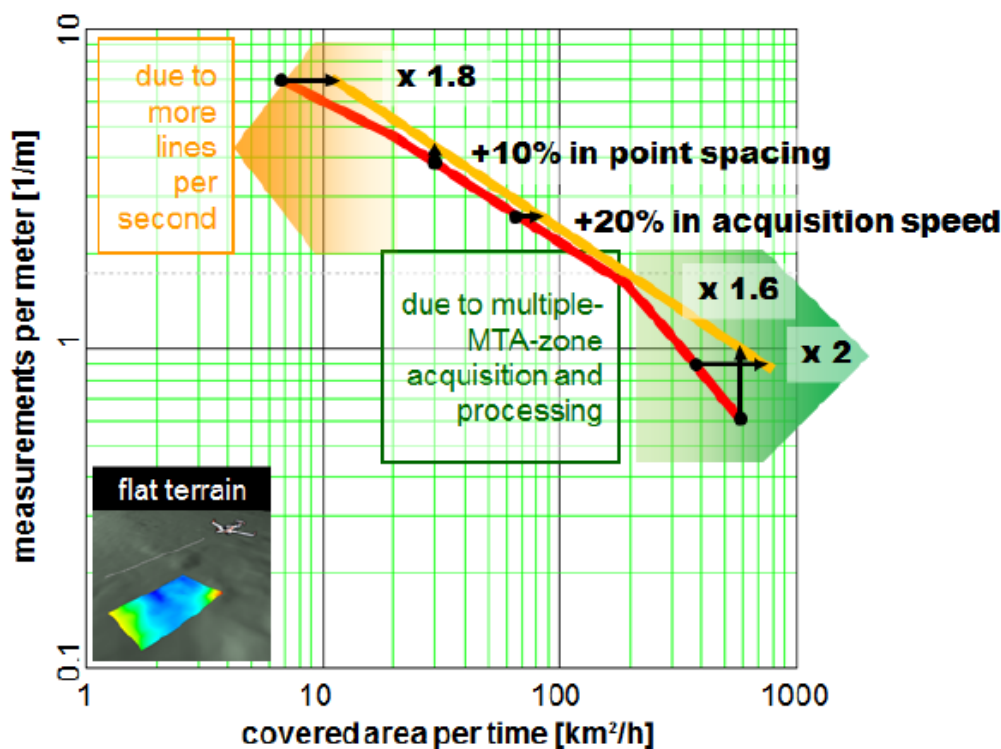


図 1 8 : 平坦な地形でのデータ収集における装置 A (オレンジ色) と装置 B (赤色) の「サンプリング周波数」対「収集速度」。(性能の違いについては本文をお読み下さい。)

6. 2 丘陵地形での収集速度の比較

単一ストリップ内に地上高 200 m の変化を想定する丘陵地形では、装置 B 及び装置 C の 2 チャンネル間の「out-of-phase」状況を全スワスに渡って維持する事ができず、従ってパラメータはセクション「2. 4」で述べたのと比べても異なった状態に最適化しなければなりません。（ $a=b$ の代わりに $a=b/2$ ）

図 1 9 は再度、装置 A と装置 B で達成できる性能を表示しています。その差はもっと大きくなっています。中間的な収集速度（「20 km²/h」から「200 km²/h」）でさえ、装置 A は装置 B の 2.6 倍速くなっています。或いは、同じ収集速度では、装置 A は 60% サンプリング周波数が優れていると言えます。

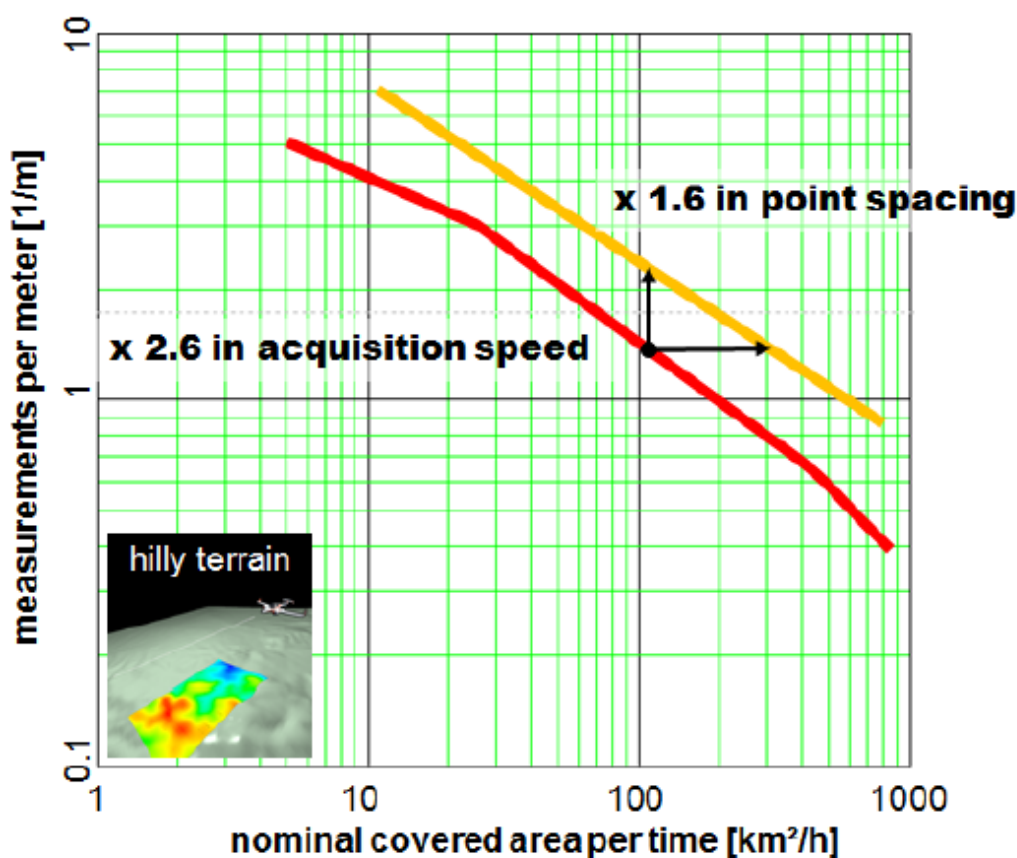


図 1 9 : 丘陵地形でのデータ収集における装置 A（オレンジ色）と装置 B（赤色）の「サンプリング周波数」対「収集速度」。
（性能の違いについては本文をお読み下さい。）

6. 3 山岳地形での収集速度の比較

単一ストリップ内に地上高 1000 m の変化を想定する山岳地形では、やはり装置 B 及び装置 C の 2 チャンネル間の「out-of-phase」状を全スワスに渡って維持する事ができず、従ってここでもパラメーターは (a=b の代わりに a=b/2) に応じて最適化しなければなりません。さらに装置 B は単一の MTA ゾーンでしかデータ収集ができないと言う制限の為に許容されるレーザー繰返しレートが極端に低くなります。

図 20 は装置 A と装置 B で達成できる性能を示しています。収集速度もサンプリング周波数でも、その差は大きくなっています。中間的な収集速度 (「20 km²/h」から「200 km²/h」) でも、装置 A は装置 B と比べて 8 倍の速さでデータ収集ができます。或いは、同じ収集速度では装置 A は 170% 良好なサンプリング周波数になります。図を導き出す為に、我々は地形追従は使用せず、トラジェクトリーは固定の高度を選択する事を想定しています。装置 B 及び装置 C では、ある程度のサンプリング品質を確保する為に地形追従が、その品質を改良するかもしれませんが、収集速度や収集コストは改良されません。

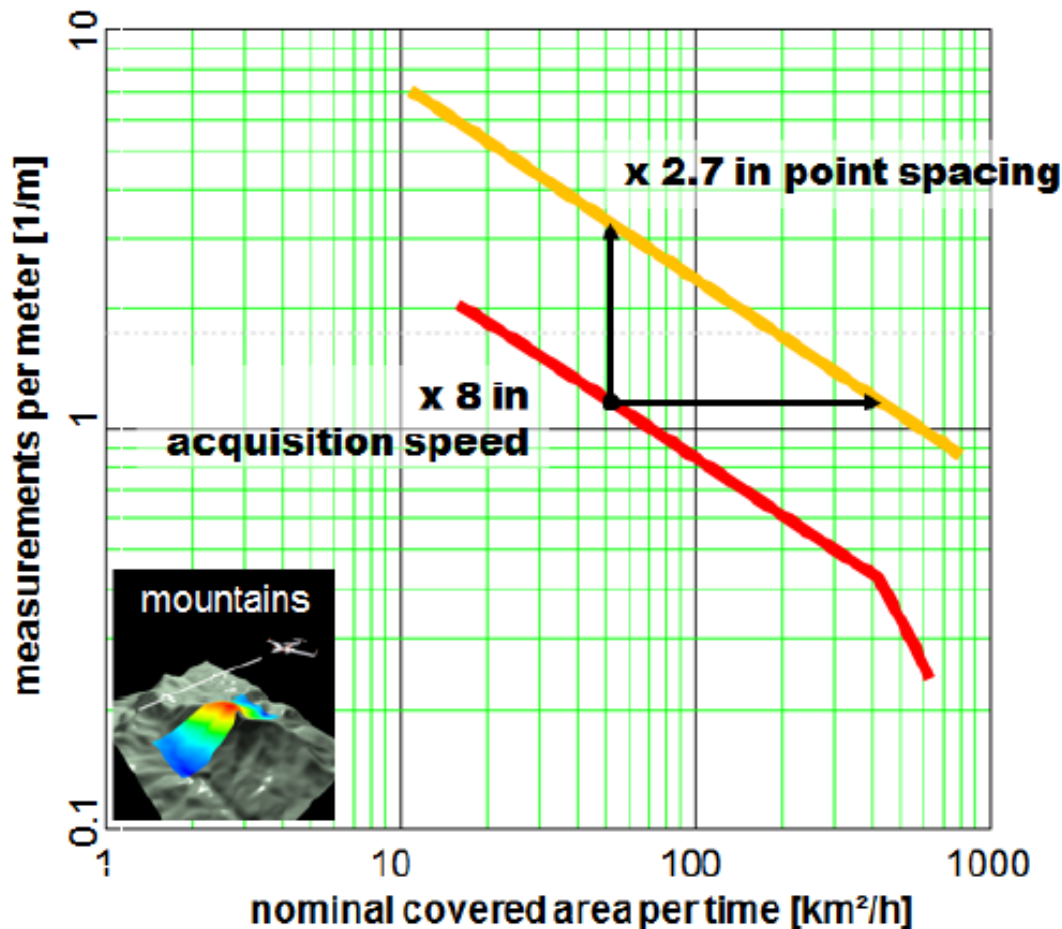


図 20 : 山岳地形でのデータ収集における装置 A (オレンジ色) と装置 B (赤色) の「サンプリング周波数」対「収集速度」。(性能の違いについては本文をお読み下さい。)

7」 参考資料

- [1], Geo-matching, <http://www.geo-matching.com>, information retrieved February 2013.
- [2], Instrument data retrieved from the manufacturer's web sites (in alphabetical order), www.leica-geosystems.com, www.optech.ca, www.riegl.com, all accessed in February 2013
- [3], "LIDAR Guidelines and Base Specification", U.S. Geological Survey, National Geospatial Program, Version 13, retrieved from lidar.cr.usgs.gov in January 2013.
- [4], "LIDAR density and spacing specification", ASPRS standard Version 1.0, Draft 2.
- [5], "Unbiased LIDAR Data Measurements (Draft)", Ty Naus, Fugro Horizon Inc., retrieved from www.asprs.org in January 2013.]