

Title	単一モータを用いた3次元メッシュ軌道走査機構の開発
Author(s)	中島, 晨之介
Citation	
Issue Date	2016-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/13620
Rights	
Description	Supervisor: 丁 洛榮, 情報科学研究科, 修士

単一モータを用いた
3次元メッシュ軌道走査機構の開発

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科

中島 晨之介

平成28年3月

修士論文

単一モータを用いた
3次元メッシュ軌道走査機構の開発

1410032 中島 晨之介

主指導教員 丁 洛榮
審査委員主査 丁 洛榮
審査委員 浅野 文彦
審査委員 吉高 淳夫

北陸先端科学技術大学院大学

情報科学研究科

平成28年2月

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 先行研究	5
1.3 3次元走査装置のモデル化と走査軌道の定義	5
1.4 先行開発された装置の問題点	7
1.5 本研究の目的	8
1.6 本研究の概要	8
1.7 本論文の構成	8
第2章 メッシュ状走査軌道の提案	9
2.1 走査軌道に求められる性質	9
2.2 単位走査軌道の定義	9
2.3 単位走査軌道の形状と各パラメータの関係	10
2.4 メッシュ状走査軌道の構成	12
第3章 走査軌道の性質に関するシミュレーション	14
3.1 シミュレーションの概要	14
3.2 シミュレーション対象となる走査軌道の設定	15
3.3 球体内に存在する測定点数 N_i に関するシミュレーション	16
3.4 N_i に関するシミュレーションについての考察	19
3.5 z 座標を制限した N_i に関するシミュレーション	19
3.6 z 座標を制限した N_i に関するシミュレーションについての考察	22
3.7 $d_{i,k}$ の標準偏差 σ_i に関するシミュレーション	23
3.8 σ_i に関するシミュレーションについての考察	24
3.9 シミュレーション結果に基づいた走査軌道の評価	28
第4章 3次元走査装置の開発	29
4.1 3次元走査装置の概要	29
4.2 回転動力生成機構の概要	31
4.3 回転数変換機構の概要	33
4.4 往復回転運動生成機構の概要	33
4.5 各パラメータの決定	37
4.6 データの取得および処理	37

第5章	3次元走査装置を用いた外部環境測定実験	41
5.1	予備実験の実施	41
5.2	予備実験結果の考察	43
5.3	実験の概要	43
5.4	円筒内部の測定	45
5.5	階段形状の測定	45
5.6	外部環境測定実験に関する考察	49
第6章	まとめ	54
6.1	結論	54
6.2	今後の課題	54

第1章 序論

1.1 研究の背景

センサを用いた外部環境の測定は、障害物の検出や物体の形状認識などへ応用される重要な技術である。センサによる外部環境測定が応用されているシステムの1つとして、セコム株式会社が販売する「レーザーセンサー」(図 1.1) が挙げられる。このシステムは赤外線レーザを照射し、レーザ光の反射を検出することによって外部環境の測定を行い、得られたデータをもとに侵入者の検出を行っている。また自動車への導入が近年進んでいるADAS(Advanced Driving Assistant System)においても、センサによる外部環境の測定は不可欠である。図 1.2 に示すシステムでは、ミリ波レーダや画像センサなどを組み合わせて外部環境を測定し、先行車両との車間距離制御や、障害物や先行車両との衝突を回避する自動ブレーキ制御などを実現している。2012年3月に発生した東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所での事故においては、図 1.3 に示す災害用ロボット Quince が投入された。Quince にはカメラや線量計、水位計といった多くのセンサが搭載され、人間が入ることが困難な建屋内の環境をモニタリングするなどの役割を担った。

このようにセンサを用いた外部環境測定は多くのシステムに導入され、システムの自動化や効率化に大きく貢献している。その一方で、センサには測定範囲の限界が存在するため、単体のセンサのみでは測定できない領域、すなわち死角が発生してしまう点が問題となる。この問題を解決するための方法の1つとして、センサの個数を増やすことで各センサの死角を相互にカバーするセンサアレイ方式が提案されている [1]。センサアレイ方式では複数のセンサによる同時測定が可能であるため、測定そのものに要する時間は単体のセンサを用いた場合の測定時間と同じである。一方で、使用するセンサ1つあたりの測定範囲が狭いほど死角をカバーするために必要となるセンサ数が増加するため、高価なセンサを使用する場合にはコスト面で負担が大きくなってしまう。

複数のセンサを用いることによるコスト増加の問題を解決するための手法として、単体のセンサの測定方向を機構によって変化させるものが提案されている。代表的な機構として、パン方向とチルト方向の回転角度を個別のモータを用いて制御するパン・チルト機構が挙げられる [2]。パン・チルト機構を用いる場合、測定方向を任意に変化させることが可能となるため、3次元空間を走査することによって死角のない外部環境測定を実現することができる。またセンサそのものをパン・チルト機構に搭載するという原理上、すべてのセンサに対して機構を適用することが可能である。その一方で、機構を駆動するために最低でも2つのモータが必要となる点が問題となる。機構を構成するモータの1つが、センサに加えてもう1つのモータを駆動する構造となるため、駆動の際に発生する慣性力やモーメントの影響が大きくなってしまう。そのため測定の高速化を実現することが難しく、移動ロボットなど機構を搭載する対象へ悪影響をおよぼす可能性も想定される。また

モータ数の増加は消費電力の増加にも繋がるため、バッテリーによって稼働するシステムにおいては動作時間減少の要因となる。

パン・チルト機構がすべてのセンサに適用可能であるのに対して、近年では適用するセンサを限定することで、単一のモータによる3次元空間の測定を実現する手法も提案されている。Surmann(2001)らは、センサ単体で平面の測定を実現するレーザレンジファインダに着目し、チルト方向の回転角度の制御のみで3次元空間の測定を行うことが可能な装置を提案した[3]。レーザレンジファインダを用いた同様の装置については、Nemoto(2007)ら、Morares(2011)らによっても提案されており、3次元空間の測定に対して一定の成果を挙げている[4, 5]。Yoshida(2011)らは、単一のモータによってパン方向の回転とチルト方向の揺動を発生させる機構を提案し、その機構をレーザレンジファインダに適用することによって外部環境の測定を実現した[6]。Kimoto(2014)らは、ミラーによるレーザの反射を利用し、ミラーの角度を制御することでレーザの進路を変化させ、レーザの走査によって外部環境の測定を実現するセンサを提案した[7]。松本(2013)は、曲面鏡をレーザレンジファインダの周りで回転させることによって、レーザを異なる方向へ反射させ、走査による3次元空間の測定を実現するシステムを提案した[8]。今村(2014)らは、レーザレンジファインダを搭載したマルチコプタの姿勢を制御することによって、レーザレンジファインダによる3次元空間の測定を実現する手法を提案した[9]。藤原(2013)らは、2次元平面を測定可能なセンサであるカメラと、レーザレンジファインダを組み合わせることによって、外部環境を3次元的に測定することが可能なシステムを提案した[10]。

以上で述べたように、光学的センサ、特にレーザレンジファインダを用いた3次元空間の測定については、単一のモータによって駆動する機構やモータを必要としないシステムが数多く報告されている。しかし[6], [7], [8], [10]で提案された機構は完全な3次元空間を測定することが不可能であり、測定範囲についての課題が存在する。それに加えて、これらの機構は適用することができるセンサに限られるため、汎用性に欠ける点が問題となる。物体までの距離を測定し、得られたデータから物体の形状を認識することはレーザレンジファインダやレーザ測距センサを用いることで実現することが可能であるが、物体の色や周囲の温度、音などの要素を測定することはできない。物体の色を測定するためにはイメージセンサ、周囲の温度を測定するためにはサーモカメラなどのセンサを用いる必要があるが、これらのセンサについても測定範囲の限界は存在するため、3次元空間の測定を実現するためには測定範囲の拡大が不可欠である。音を検出するための代表的なセンサであるマイクについては、全方位を測定範囲とする全方位マイクが存在する。しかし全方位マイクでは音の大きさを測定することはできるものの、音源がどの方向に存在するかを判別することは難しい。高指向性マイクの測定方向を変化させることで、測定範囲を3次元空間に拡大するだけでなく、音源の方向の検出を実現することができる。このような背景から、センサの構造や性質に依存せず3次元空間の測定を行う手法は重要となるが、その手法としては複数のモータを使用するパン・チルト機構を用いることが主流である。単一のモータによって駆動する機構として、リンク機構を用いた[11]が提案されているが、このような手法の報告は非常に少ない。



図 1.1: レーザーセンサー (http://www.secom.co.jp/corporate/release/2010/nr_20101001.html)



図 1.2: ADAS 向け車載センサ (<http://www.globaldenso.com/ja/products/oem/driving-assist-system/>)

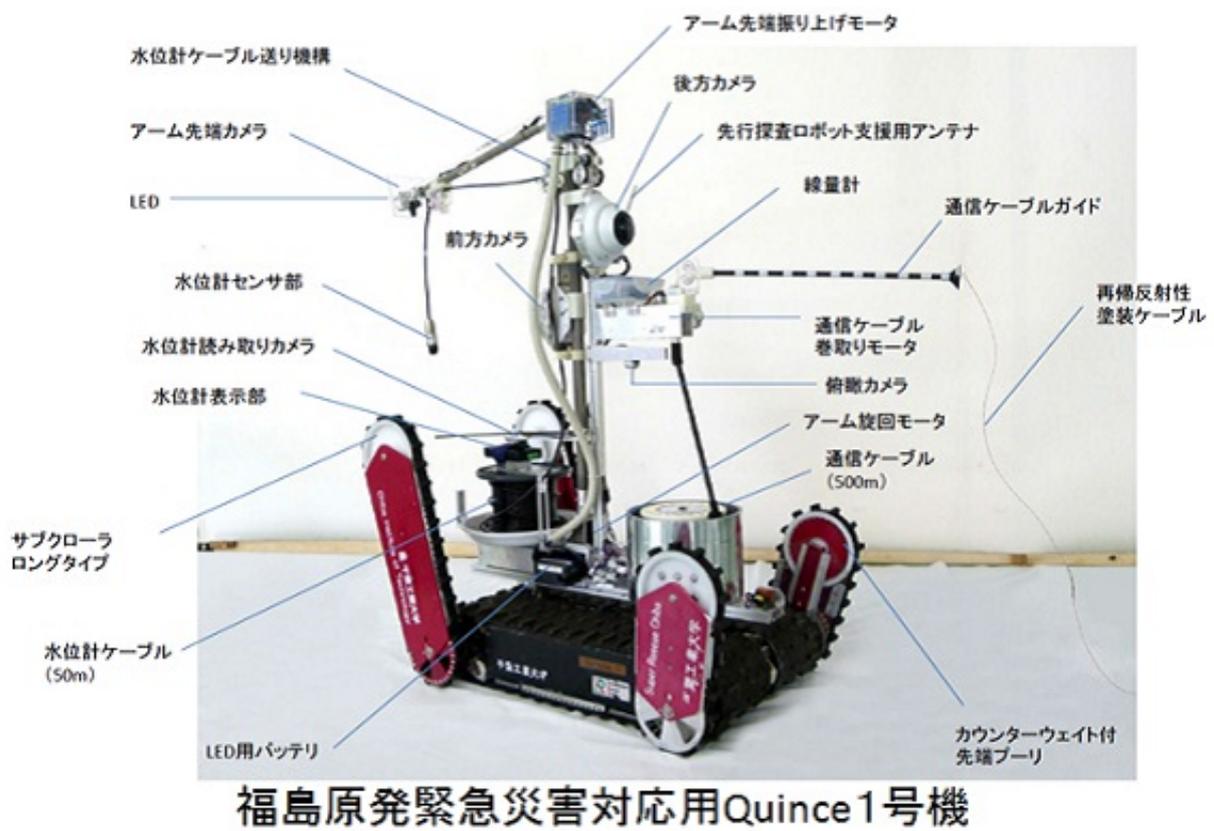


図 1.3: 災害用ロボット Quince (http://www.rm.is.tohoku.ac.jp/quince_mech/#Quince_1)

1.2 先行研究

本研究室では，単一のモータによって駆動し，センサの構造や特性に依存せずに3次元空間の測定を実現する3次元走査機構についての研究を行っており，すでに2種類の機構が提案されている [12, 13]. 先行開発された2種類の機構を図1.4および1.5に示す. 双方の機構に共通する特徴として，螺旋軌道によって3次元空間を走査し，外部環境の測定を行う点が挙げられる. 以下本論文中では，図1.4および1.5に示す機構が空間を走査する軌道を螺旋軌道あるいは螺旋状走査軌道と記述し，同義として扱うものとする.

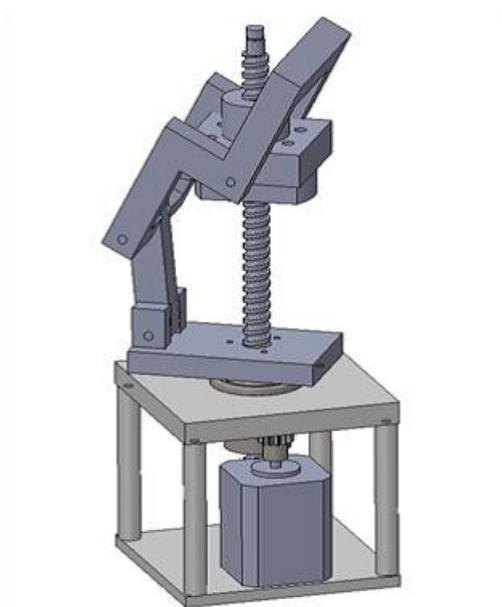


図 1.4: ネジとリンク機構を用いた3次元螺旋軌道走査機構 [14]

1.3 3次元走査装置のモデル化と走査軌道の定義

3次元走査機構のモデル化および走査軌道の定義を行う. 機構のモデルを図1.6に示す. 3次元走査機構の走査軌道は，機構中心から軌道までの距離と測定方向によって決定される. 図1.6のモデルでは，軌道までの距離および方向を，機構中心に設置されたアームによって表現している. アームはパン方向およびチルト方向に回転し，アーム長 r が軌道までの距離に対応する. アームのパン方向の回転角度 θ は，3次元走査機構に搭載された単一のモータによって直接制御される. チルト方向の回転角度は，パン方向の回転に伴って駆動する機構によって決定されるため， θ の関数 $f(\theta)$ として定義される. パン方向の回転角度 θ を変化させた際に，アーム先端の点 $P(\theta)$ が移動する軌跡を走査軌道として定義する.

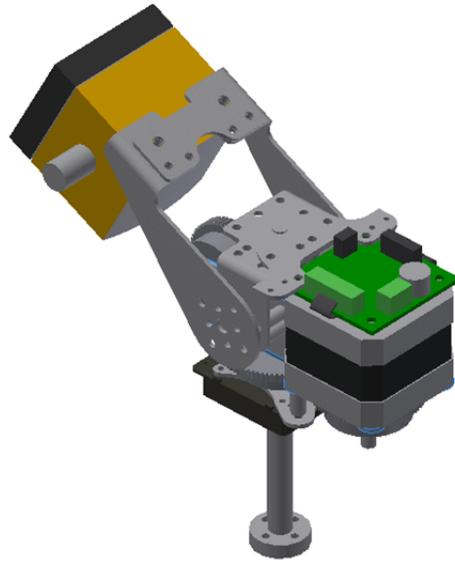


図 1.5: ウォームギヤを用いた 3次元螺旋軌道走査機構 [13]

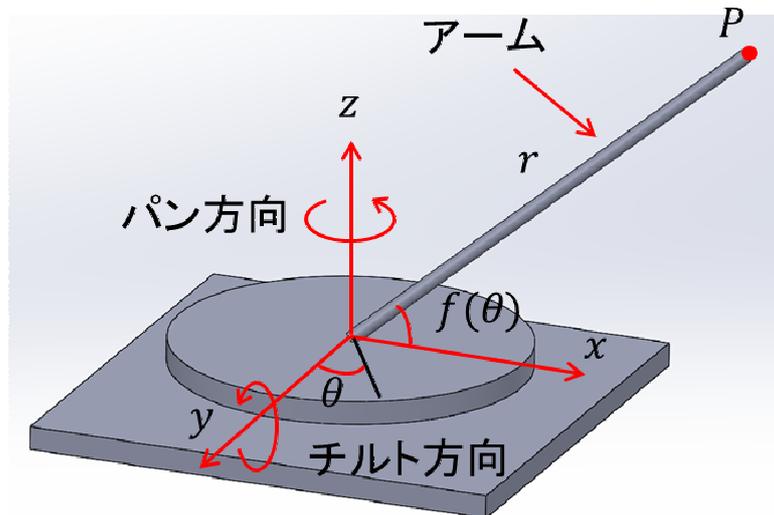


図 1.6: 3次元走査機構のモデル

1.4 先行開発された装置の問題点

螺旋状走査軌道の一例を図 1.7 に示す。図 1.4 に示す機構にセンサを搭載し、3次元空間の測定を行うことを考える。センサによって取得されるデータは時間的に離散であり、データを取得する時間間隔はセンサの性能やプロセッサの処理能力に依存する。測定点の空間上での分布については、データ取得に要する時間間隔に加えて、走査軌道の形状および空間の走査速度すなわち機構の駆動速度によって決定される。3次元走査機構において、走査軌道の形状は機構の機械的構造によって一意に決定され、空間の走査速度は搭載されたモータの駆動速度のみに依存する。すなわち、あらかじめ決定された走査軌道上をどの程度の間隔で測定するかによって、測定点の分布が変化することになる。

螺旋状走査軌道は θ の変化量に対する $f(\theta)$ の変化量が非常に小さいため、局所的に見た軌道の形状は水平に近くなる。そのため走査速度を落とすことによってパン方向の測定点の分布密度を向上させることはできるものの、チルト方向の測定点の分布密度の向上は期待できない。それに加えて、垂直方向の軌道間隔は機構からの距離に比例して大きくなるため、遠方を測定する際には測定点の分布が集中してしまう。分布が集中する場合、特定の形状の測定では優位となるものの、形状によっては良好な測定を行うことが困難となる。螺旋状走査軌道について述べると、水平方向には比較的密な測定点分布を得られるものの、垂直方向については軌道間隔より狭い間隔の分布を得ることは非常に困難である。移動ロボットなどのシステムにおいては状況に応じた柔軟な外部環境測定が求められるが、先行開発された機構では走査速度の違いによる測定点分布の変化が限定的であり、分布を大きく変化させるには機械的構造の変更が要求されるため、実現は困難である。

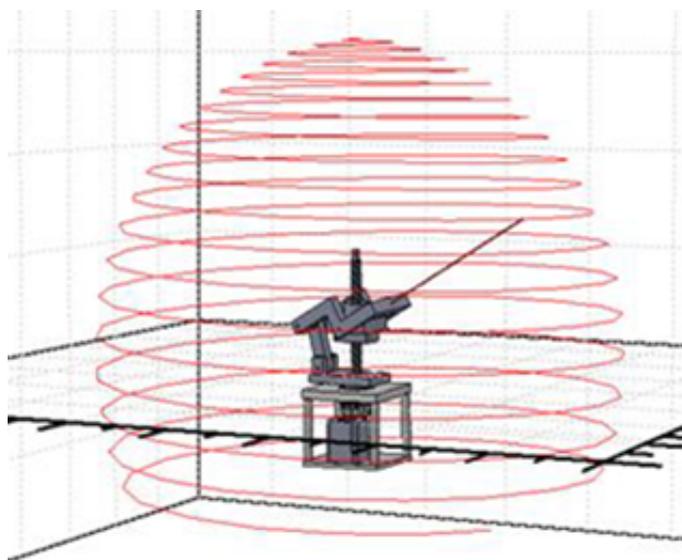


図 1.7: ネジとリンク機構を用いた 3次元螺旋軌道走査機構の走査軌道

1.5 本研究の目的

本研究の目的は、先行開発された機構の問題点である遠方測定時の測定点分布の集中を解決した、単一のモータによって駆動する3次元走査機構の開発を行うことである。従来の3次元走査機構で採用されている螺旋状走査軌道とは異なる新たな走査軌道を提案し、測定点分布の分散化を図る。

1.6 本研究の概要

本研究では、はじめに螺旋状走査軌道に替わる新たな走査軌道としてメッシュ状走査軌道を提案する。続いて、提案したメッシュ状走査軌道と従来の螺旋状走査軌道を対象としたシミュレーションを行い、結果を検証することで2つの軌道の性質を比較する。次に、メッシュ状走査軌道によって3次元空間を走査する3次元走査機構を提案し、その原理および構造について述べる。最後に、先行開発された3次元走査機構と提案した3次元走査機構の双方に同じレーザ測距センサを搭載し、外部環境測定実験を実施する。その結果を比較することによって、提案したメッシュ状走査軌道および3次元走査機構の有効性を検証する。

1.7 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。第1章は序論であり、研究の背景や概要について述べる。第2章では、メッシュ状走査軌道を構成する単位走査軌道を定義し、単位走査軌道とメッシュ状走査軌道の関係について述べる。第3章では、メッシュ状走査軌道と螺旋状走査軌道を用いたシミュレーションを行い、軌道の性質について比較する。第4章では、メッシュ状走査軌道によって空間を走査する3次元走査機構について、その原理および構造を示す。第5章では、第4章で提案する3次元走査機構と先行開発された3次元走査機構を用いた実験およびその結果について述べる。そして第6章では、本研究の結論および今後の課題について述べる。

第2章 メッシュ状走査軌道の提案

2.1 走査軌道に求められる性質

従来の螺旋状走査軌道における測定点分布の集中は、 θ の変化量に対する $f(\theta)$ の変化量が非常に小さいことに起因する。そのため、 θ の変化量に対する $f(\theta)$ の変化量を増加させることで分布の分散を実現することができると考えられる。しかし $f(\theta)$ の変化量の過度な増加は、 θ の変化量に対する $f(\theta)$ の変化量が非常に大きくなるという、螺旋状走査軌道と逆の問題を引き起こしてしまう。このような性質を持った走査軌道では、走査速度を落とすことによるチルト方向の測定点分布密度の向上は実現できるものの、パン方向の分布密度向上は期待できず、結果として測定点の分布が集中してしまう。

そこで本研究では、 θ の変化量に対する $f(\theta)$ の変化量が同程度となる、メッシュ状走査軌道を提案する。メッシュ状走査軌道では、走査速度を落とすことによってパン方向とチルト方向の双方に対して測定点分布密度を向上させることが可能となるため、螺旋状走査軌道と比較して測定点分布の分散が期待できる。

2.2 単位走査軌道の定義

メッシュ状走査軌道は複数の単位走査軌道を重ね合わせることで構成される。単位走査軌道は式 (2.1)~(2.3) として定義される。この定義は図 1.6 に示すモデルに基づいており、式中に表れる各パラメータは図中のものに準拠する。

$$\begin{cases} x = r |\cos f(\theta)| \cos \theta \\ y = r |\cos f(\theta)| \sin \theta \\ z = r \sin f(\theta) \end{cases} \quad (2.1)$$

$$f(\theta) = -\frac{\theta_t}{2} \cos \frac{360}{\theta_p} \theta + \left(\theta_m - \frac{\theta_t}{2} \right) \quad [\text{deg}] \quad (2.2)$$

$$0 \leq \theta \leq \theta_p \quad [\text{deg}] \quad (2.3)$$

θ_p および θ_t はそれぞれアームのパン方向、チルト方向の回転領域を決定するパラメータであり、角度が与えられる。また θ_m はアームのチルト方向の最大角度である。なお、パン方向の回転角度は任意の角度を基準とし、チルト方向の回転角度は水平を基準とする。

$f(\theta)$ は、パン方向の回転に伴うアームのチルト方向の回転運動を決定する関数である。各パラメータとアームのチルト方向の角度の関係を示したモデルを図 2.1 に示す。式 (2.2) の第一項は余弦項となっており、アームのチルト方向の回転運動が特定の振幅を持った往復運動となることを表している。第二項は、アームの往復回転運動がチルト方向のどの角度を基準として行われるかを決定する項である。

アームのパン方向の回転角度 θ の定義域は式 (2.3) によって定義されるため、単位走査軌道のパン方向の走査領域は θ_p となる。式 (2.2) の周期は θ_p であるため、アームはパン方向に角度 θ_p 回転する間に、チルト方向に 1 往復の回転運動を行う。すなわち単位走査軌道の始端から終端に至るまでの間に、チルト方向の走査領域は 1 往復走査されることになる。

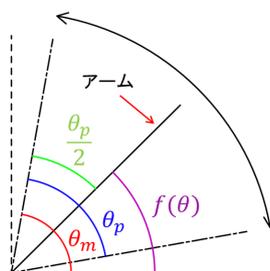


図 2.1: 各パラメータとアームの角度の関係

2.3 単位走査軌道の形状と各パラメータの関係

単位走査軌道の形状は、軌道の始端と終端の差異および走査軌道の交差の観点から分類することができる。はじめに走査軌道の始端と終端の差異に着目する。 θ_p が式 (2.4) を満たす場合、走査軌道の始端と終端が一致せず、差異が生じる。

$$\theta_p \neq 360n \text{ [deg]} \quad (n \text{ は } 0 \text{ を除く整数}) \quad (2.4)$$

θ_p が式 (2.4) を満たさない場合、単位走査軌道のパン方向の走査領域は $360[\text{deg}]$ の倍数となるため、始端と終端が一致する。

次に走査軌道の交差に着目する。 θ_p が式 (2.5) を満たす場合、軌道の始端から終端に至るまでの間に軌道は交差しない。すなわち、単位走査軌道は一度走査したパン方向の領域を重複して走査しない。

$$\theta_p < 360 \text{ [deg]} \quad (2.5)$$

θ_p が式 (2.5) を満たさない場合、単位走査軌道のパン方向の走査領域は部分的に重複することになる。 θ_p と単位走査軌道の形状の関係を表 2.1 に示す。 θ_p の値が異なる、3つの単位走査軌道を図 2.2~2.4 に示す。 θ_p 以外のパラメータには、以下に示す共通の値を設定する。

$$r = 1 \text{ [mm]} \quad \theta_t = 90 \text{ [deg]} \quad \theta_m = 90 \text{ [deg]}$$

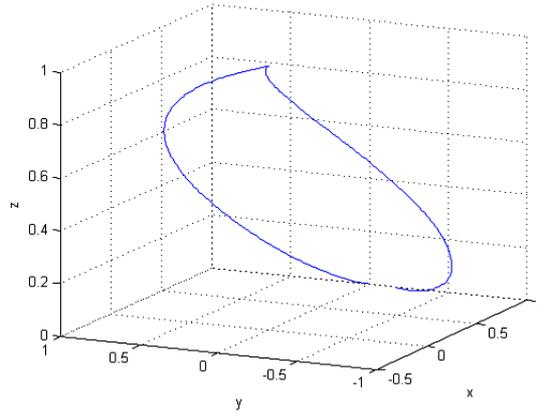


図 2.2: $\theta_p = 350[\text{deg}]$ の単位走査軌道

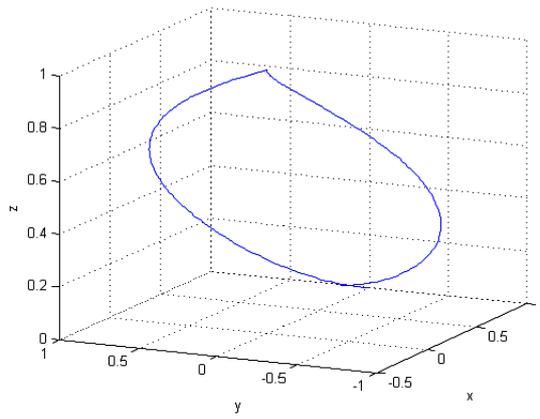


図 2.3: $\theta_p = 370[\text{deg}]$ の単位走査軌道

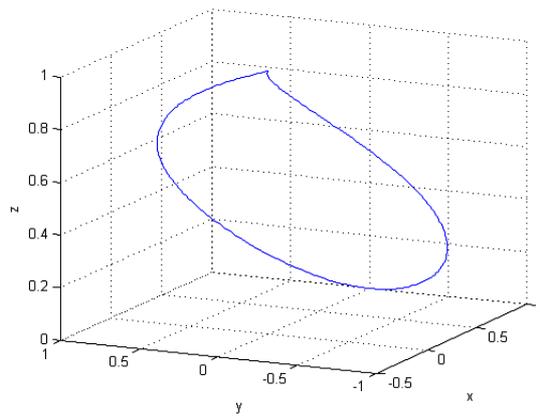


図 2.4: $\theta_p = 360[\text{deg}]$ の単位走査軌道

表 2.1: θ_p と単位走査軌道の形状の関係

θ_p [deg]		始端と終端の差異	軌道の交差
$\neq 360n$	≤ 360	○	×
	> 360	○	○
$= 360n$	< 360	×	×
	≥ 360	×	○

2.4 メッシュ状走査軌道の構成

メッシュ状走査軌道は、複数の単位走査軌道を重ねあわせることで構成される。単位走査軌道のパン方向の回転角度 θ は式 (2.3) に示す定義域を持つ。すなわち定義域を超えたパン方向の回転角度を与えることは、複数の単位走査軌道を重ね合わせることに同義となる。走査軌道は連続的であるため、ある単位走査軌道の終端は次の単位走査軌道の始端と一致する。よって i 番目の単位走査軌道の始端を $P_{Si}(\theta_{Si})$ 、終端を $P_{Ei}(\theta_{Ei})$ とすると、式 (2.6) に示す関係が成り立つ。

$$P_{Si+1}(\theta_{Si+1}) = P_{Ei}(\theta_{Ei}) \quad (2.6)$$

式 (2.4) を満たす、すなわち始端と終端が一致しない単位走査軌道について考える。単位走査軌道の始端と終端の間に発生するパン方向の角度差は式 (2.7) によって得られる。

$$\theta_p - 360 \text{ [deg]} \quad (2.7)$$

式 (2.6) および (2.7) の関係を利用することで、パン方向の角度を連続的に変化させることによって、パン方向に角度変位した複数の単位走査軌道を重ね合わせることが可能となる。以下のパラメータを与えた複数の単位走査軌道によって構成されるメッシュ状走査軌道を図 2.5 に示す。

$$r = 1 \text{ [mm]} \quad \theta_p = 350 \text{ [deg]} \quad \theta_t = 90 \text{ [deg]} \quad \theta_m = 90 \text{ [deg]}$$

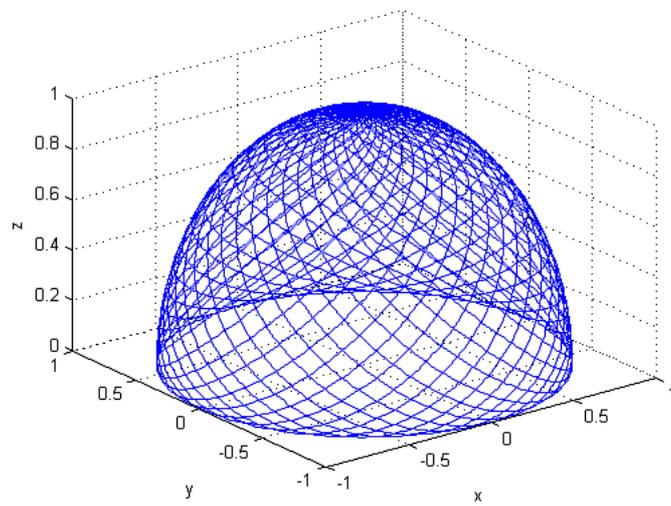


図 2.5: $\theta_p = 350[\text{deg}]$ のメッシュ状走査軌道

第3章 走査軌道の性質に関する シミュレーション

3.1 シミュレーションの概要

メッシュ状走査軌道と螺旋状走査軌道の比較を目的とするシミュレーションを行った。各走査軌道上に n 個の測定点 $P_i(\theta_i)$ を設定した。なお i は整数であり、式 (3.1) の条件を満たす。

$$1 \leq i \leq n \quad (3.1)$$

測定点はパン方向の角度が等間隔となるように配置されるため、 θ_i は式 (3.2) によって得られる。 θ_{max} は走査軌道を構成するために要する、パン方向の回転角度である。

$$\theta_i = \frac{\theta_{max}}{n}(i - 1) \text{ [deg]} \quad (3.2)$$

P_i を中心とした半径 r_p の球体を仮定し、球体内部に存在する測定点 P_j ($j \neq i$) の個数 N_i と、球体中心から球体内の各測定点までの距離 $d_{i,k}$ ($1 \leq k \leq N_i$, k は整数) の標準偏差 σ_i をシミュレーションした。 N_i は球体を捉える測定点の数と同義であるため、空間の測定能力を測る上での指標の1つとなりうる。しかし N_i が同数であっても、分布が集中している場合と分散している場合では測定能力は大きく異なるため、絶対的な指標とはいえない。例えば測定点の分布が集中している場合、局所的には密な測定点分布を得ることができるものの、分布範囲は狭い領域となる。一方で測定点の分布が分散している場合、局所的に見た分布は疎になるものの、測定点の分布範囲は比較的広範囲となる。 N_i に加えて、 $d_{i,k}$ の標準偏差 σ_i に着目することで分布の傾向を分析し、走査軌道の性質を検証した。球体内部に存在する測定点のモデルを図 3.1 に示す。 $d_{i,k}$ の標準偏差 σ_i は式 (3.5) によって得られる。

$$\bar{d}_{i,k} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N d_{i,k} \quad (3.3)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (d_{i,k} - \bar{d}_{i,k})^2 \quad (3.4)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (d_{i,k} - \bar{d}_{i,k})^2} \quad (3.5)$$

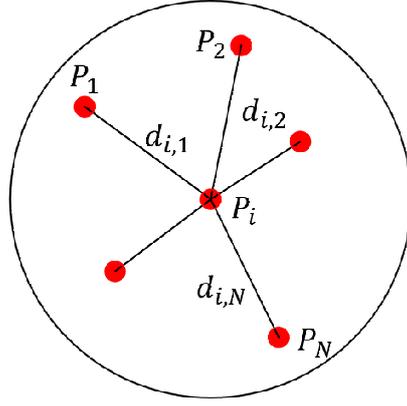


図 3.1: 球体内部に存在する測定点 P_j のモデル

3.2 シミュレーション対象となる走査軌道の設定

本シミュレーションでは、水平より上の半径 300mm の半球上を走査するように軌道を設定した。メッシュ状走査軌道の定義式を式 (3.6) および (3.7) に示す。

$$\begin{cases} x = r |\cos f(\theta)| \cos \theta \\ y = r |\cos f(\theta)| \sin \theta \\ z = r \sin f(\theta) \end{cases} \quad (3.6)$$

$$f(\theta) = -\frac{\theta_t}{2} \cos \frac{360}{\theta_p} \theta + \left(\theta_m - \frac{\theta_t}{2} \right) \quad [\text{deg}] \quad (3.7)$$

各パラメータに以下の値を与えることで、走査領域を設定した。

$$r = 300 \quad [\text{mm}] \quad \theta_p = 350 \quad [\text{deg}] \quad \theta_t = 90 \quad [\text{deg}] \quad \theta_m = 90 \quad [\text{deg}]$$

単位走査軌道の始端と終端の角度差は-10deg となるため、メッシュ状走査軌道を構成する単位走査軌道数は 36 本となる。そのため空間の走査に要するパン方向の回転角度 θ は、 θ_p と単位走査軌道数の関係から 12600deg となる。以上を踏まえて、 θ の定義域を式 (3.8) と設定した。

$$0 \leq \theta < 12600 \quad [\text{deg}] \quad (3.8)$$

螺旋状走査軌道の定義式を式 (3.9) および (3.10) に示す。

$$\begin{cases} x = r |\cos f(\theta)| \cos \theta \\ y = r |\cos f(\theta)| \sin \theta \\ z = r \sin f(\theta) \end{cases} \quad (3.9)$$

$$f(\theta) = \frac{\theta}{s} \quad [\text{deg}] \quad (3.10)$$

各パラメータに以下の値を与えることで、走査領域を設定した。

$$r = 300 \quad [\text{mm}] \quad s = 140$$

θ の定義域については、メッシュ状走査軌道と同様である。

3.3 球体内に存在する測定点数 N_i に関するシミュレーション

シミュレーション条件を表 3.1 に示す. はじめに P_i の z 座標と N_i の関係に着目した. 図 3.2 はメッシュ状走査軌道, 図 3.3 は螺旋状走査軌道のシミュレーション結果より得られたグラフである. 縦軸が測定点数 N_i , 横軸が P_i の z 座標である. z が 0~225 付近の領域では, メッシュ状走査軌道において z 座標に関わらず N_i はほぼ安定であるが, 螺旋状走査軌道では z 座標に比例して緩やかに増加することが確認できる. z がそれよりも大きな領域においてはどちらの軌道においても N_i が急増し, メッシュ状走査軌道の方が N_i が大きくなる傾向が見られる.

図 3.4~3.6 に示すのは, N_i に関するヒストグラムである. $r_p = 10$ のシミュレーションにおいて, メッシュ状走査軌道では $N_i = 0$ となった測定点 P_i の割合が全体の 60% 程度であるのに対して, 螺旋状走査軌道では約 90% となっている. またメッシュ状走査軌道では, $60 \leq N_i \leq 99$ となった P_i が全体の約 9% 程度存在していることが確認できる.

$r_p = 50$ のシミュレーションでは, どちらの軌道においても $1 \leq N_i \leq 19$ となった測定点 P_i の割合が全体の約 70% となっている. $20 \leq N_i \leq 69$ となった P_i の割合については, 螺旋状走査軌道が約 20% となるのに対して, メッシュ状走査軌道が 10% 程度となり, 螺旋状走査軌道の方が高くなっている. その一方で, メッシュ状走査軌道は $N_i \geq 200$ となった P_i が全体の約 15% 存在することが確認できる.

$r_p = 70$ のシミュレーションにおいては, メッシュ状走査軌道で $10 \leq N_i \leq 19$ となった P_i が全体の 53% 程度と最も高い割合を占めるのに対して, 螺旋状走査軌道では $20 \leq N_i \leq 29$ となった P_i の割合が約 35% と最大になる. しかしメッシュ状走査軌道では $N_i \geq 240$ となった P_i が全体の 18% 程度存在しており, これは $r_p = 10, 50$ の場合と同様の傾向である.

r_p の値に関わらず双方の軌道に共通する傾向として, ヒストグラムが谷型になっており, N_i の大きさが二極化している点が挙げられる. 二極化の傾向はメッシュ状走査軌道の方が強く, メッシュ状走査軌道においては N_i が中程度の階級で度数が 0 となっていることが確認できる.

表 3.1: N_i に関するシミュレーション条件

対象走査軌道	n	r_p
メッシュ状走査軌道	1000	10
		50
		70
螺旋状走査軌道	1000	10
		50
		70

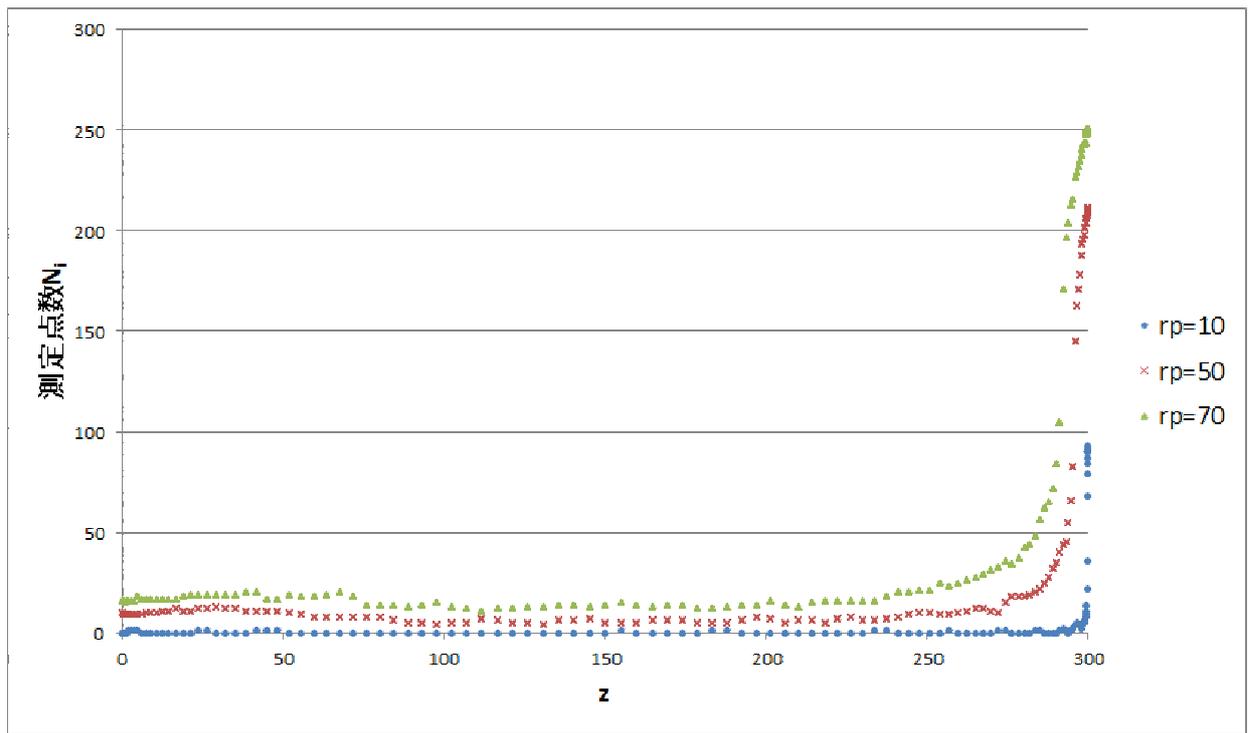


図 3.2: メッシュ状走査軌道における P_i の z 座標と N_i の関係

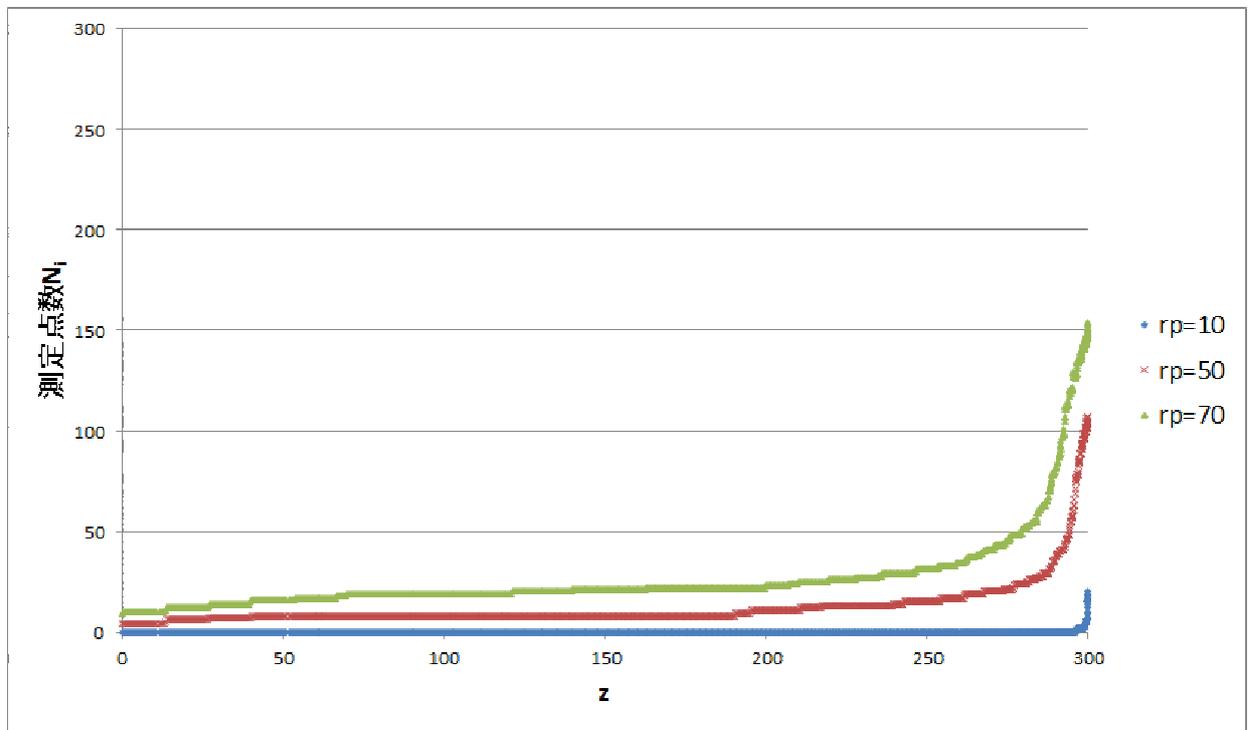


図 3.3: 螺旋状走査軌道における P_i の z 座標と N_i の関係

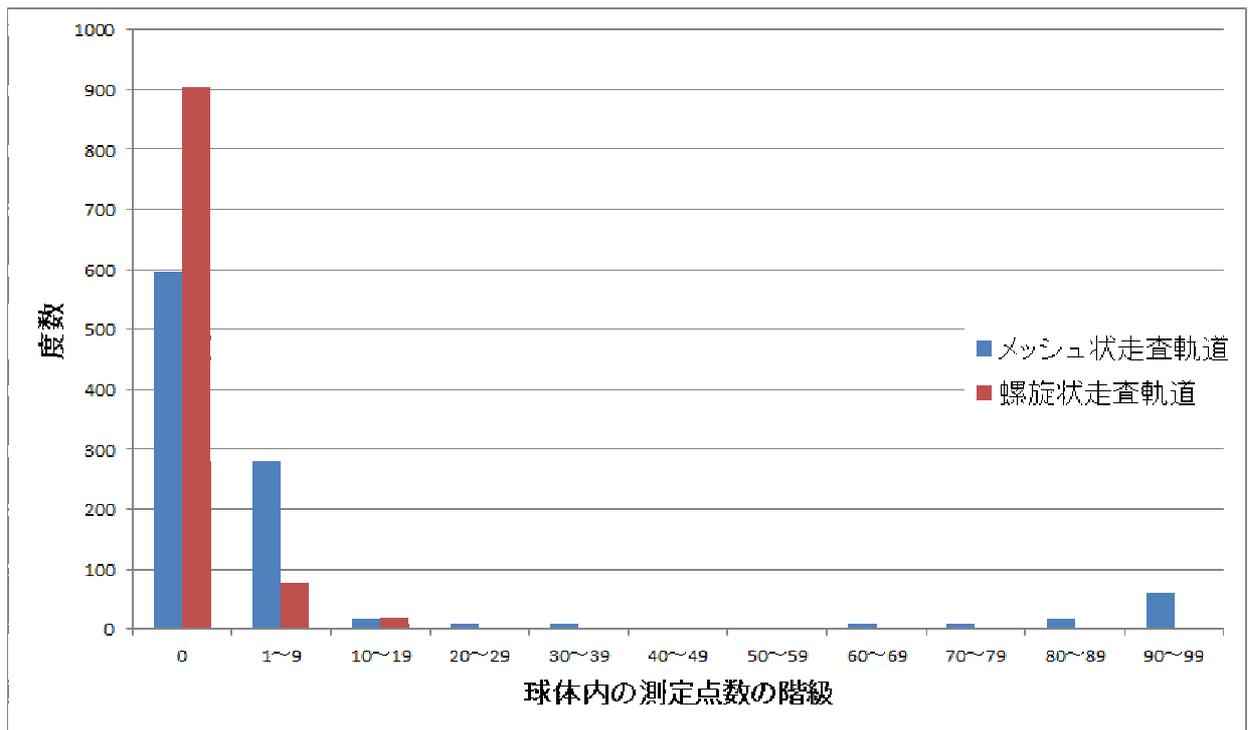


図 3.4: $r_p = 10$ における N_i のヒストグラム

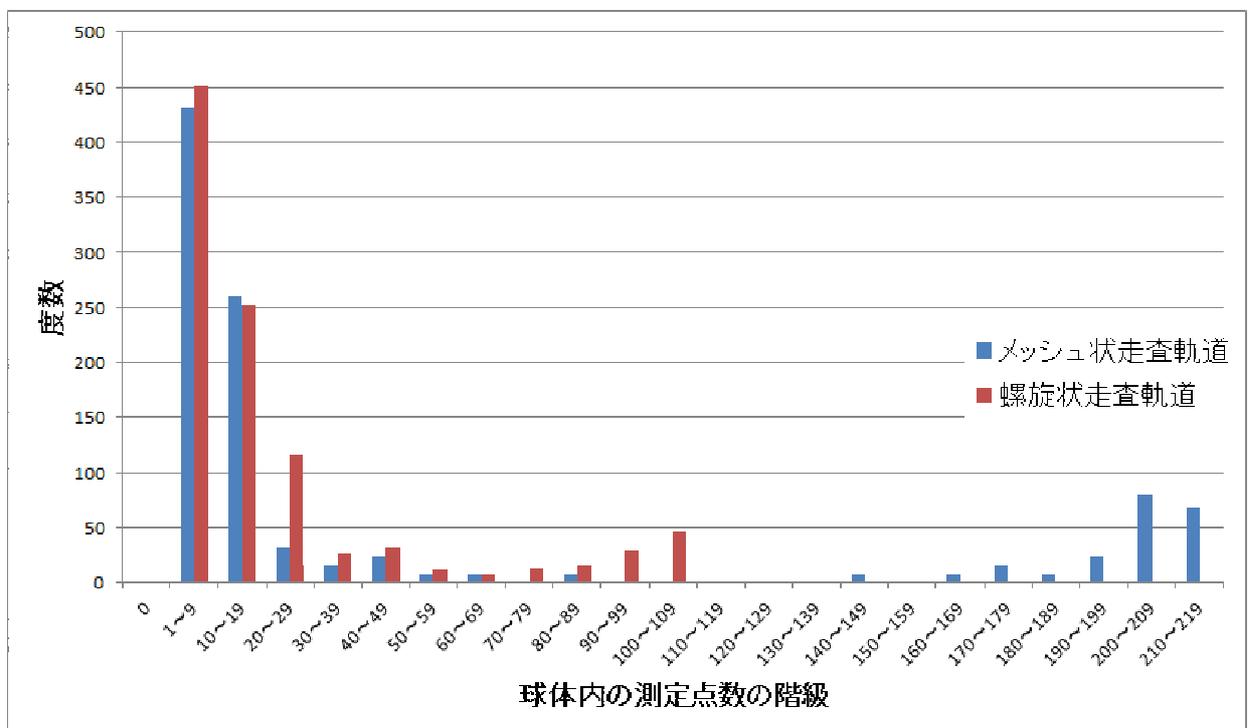


図 3.5: $r_p = 50$ における N_i のヒストグラム

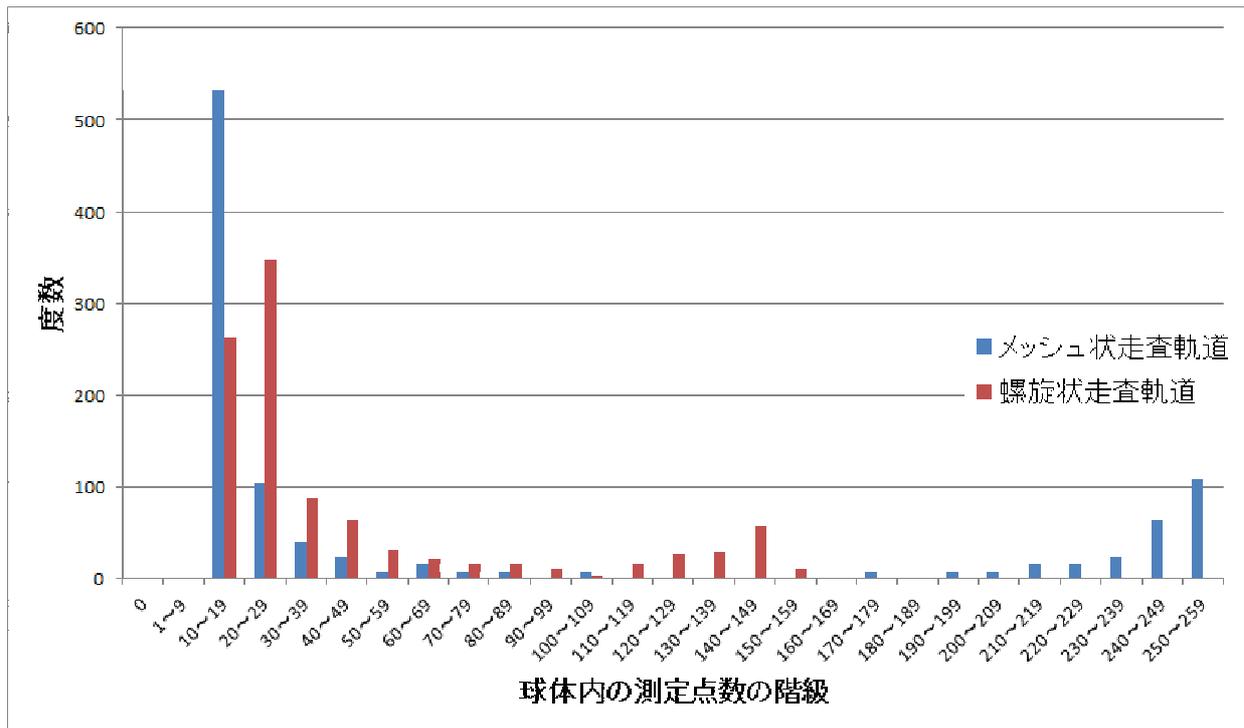


図 3.6: $r_p = 70$ における N_i のヒストグラム

3.4 N_i に関するシミュレーションについての考察

図 3.2 および 3.3 に示すように、 N_i は P_i の z 座標が大きい領域において増加する傾向が見られる。これは走査軌道が半球であるため、 z 座標が大きくなるほどパン方向回転軸に対する軌道半径が減少することに起因する。 P_i はパン方向の角度が等間隔となるように配置されるため、軌道半径が小さくなるほど測定点が密集し、球体内部に存在する P_j の数が増加すると考えられる。

図 3.4~3.6 の結果より N_i の大きさに着目すると、螺旋状走査軌道では該当する P_i が存在しないような N_i が大きな階級においても、メッシュ状走査軌道では 10 ~ 20% 程度の P_i が存在することが確認できる。以上の点より、 z 座標が高い領域における測定点の密集はメッシュ状走査軌道の方が顕著であると推察される。

3.5 z 座標を制限した N_i に関するシミュレーション

3.4 節では、3.3 節で行ったシミュレーションの結果をもとに、メッシュ状走査軌道と螺旋状走査軌道の双方において、 z 座標が大きい領域で測定点が密集していると予測した。本節では、 z 座標が大きい領域に存在する測定点 P_i および P_j を対象から除き、3.3 節と同様のシミュレーションを実施した結果について述べる。 N_i に関するヒストグラムを得ることによって、3.4 節における予測についての検証、 z 座標が大きい領域の N_i に着目した分析を行った。

走査軌道の定義式および測定点の配置は3.3節と同様である。本研究では z 座標が大きい領域を $z \geq 275$ と設定し、それ以下の z 座標領域に存在する測定点 P_i および P_j を対象としてシミュレーションを行った。

各 r_p における N_i のヒストグラムを図3.7~3.9に示す。 z 座標を制限することで、対象となった測定点数がメッシュ状走査軌道では660個、螺旋状走査軌道では739個と減少した。

$r_p = 10$ のメッシュ状走査軌道では、 z 座標の制限によって、 $N_i \geq 10$ となった測定点 P_i が存在しなくなっている。また $1 \leq N_i \leq 9$ となった測定点 P_i の数についてもほぼ半減しており、 $N_i = 0$ となった P_i についても15%程度減少している。 $r_p = 10$ の螺旋状走査軌道については、 $N_i \geq 1$ となった P_i が存在しなくなっていることが確認できる。

$r_p = 50$ のシミュレーションでは、 z 座標の制限によって、双方の軌道において $N_i \geq 20$ となった P_i が消滅している。それ以下の N_i の階級に着目すると、メッシュ状走査軌道では $1 \leq N_i \leq 9$ となった P_i が約10%増加し、 $10 \leq N_i \leq 19$ となった測定点 P_i については30%程度減少している。一方で螺旋状走査軌道では、 $1 \leq N_i \leq 9$ となった P_i の数はほとんど変化せず、 $10 \leq N_i \leq 19$ となった P_i は約15%増加している。

$r_p = 70$ のシミュレーションにおいても、メッシュ状走査軌道は同様の傾向を示している。 $N_i \geq 30$ となった P_i は存在せず、 $10 \leq N_i \leq 19$ となった P_i が約15%増加、 $20 \leq N_i \leq 29$ となった測定点 P_i については半減している。螺旋状走査軌道も $r_p = 50$ と類似した傾向を示しているが、メッシュ状走査軌道では P_i が存在しない $30 \leq N_i \leq 39$ の階級においても、すべての測定点を対象とした場合の約10%の P_i が存在する点は異なる傾向である。それ以外の階級については $r_p = 50$ と同様の傾向となっている。 $N_i \geq 40$ となった P_i は存在せず、 $10 \leq N_i \leq 19$ となった P_i はほぼ同数、 $20 \leq N_i \leq 29$ となった測定点 P_i については約35%増加している。

シミュレーションの対象となる測定点数に対する、各階級の占有率を表3.2に示す。 z 座標を制限することによって、 N_i が比較的小さい階級の占有率が上昇していることが確認できる。

表 3.2: 対象となる測定点数に対する各階級の占有率

r_p	階級	対象となる測定点数に対する占有率 [%]			
		メッシュ		螺旋	
		全領域	$z < 275$	全領域	$z < 275$
10	0	59.6	79.4	90.2	100
	1~9	28.0	20.6	7.6	0
	10~	12.4	0	2.2	0
50	1~9	43.2	72.7	45.0	61.0
	10~19	26.0	27.3	25.2	39.0
	20~	30.8	0	29.8	0
70	10~19	53.2	92.7	26.3	35.7
	20~29	10.4	7.3	34.7	62.9
	30~39	4.0	0	8.8	1.2
	40~	32.4	0	30.1	0

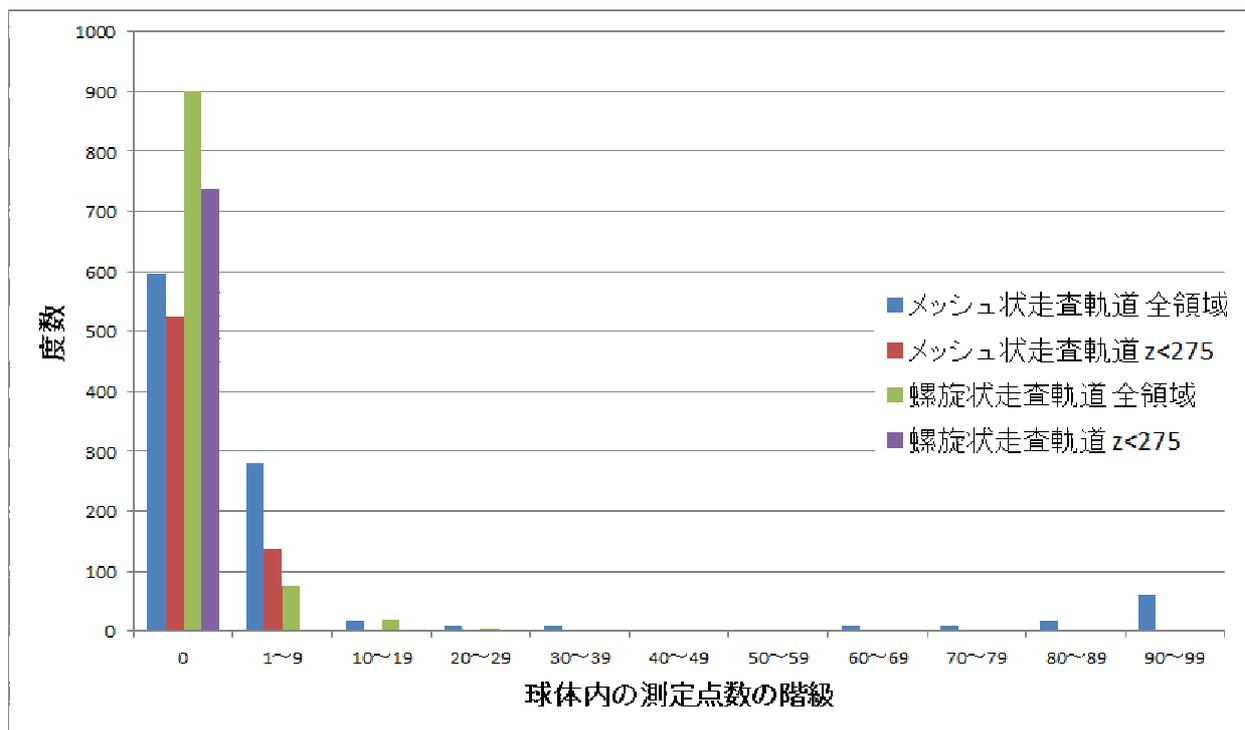


図 3.7: $r_p = 10$ における N_i のヒストグラム

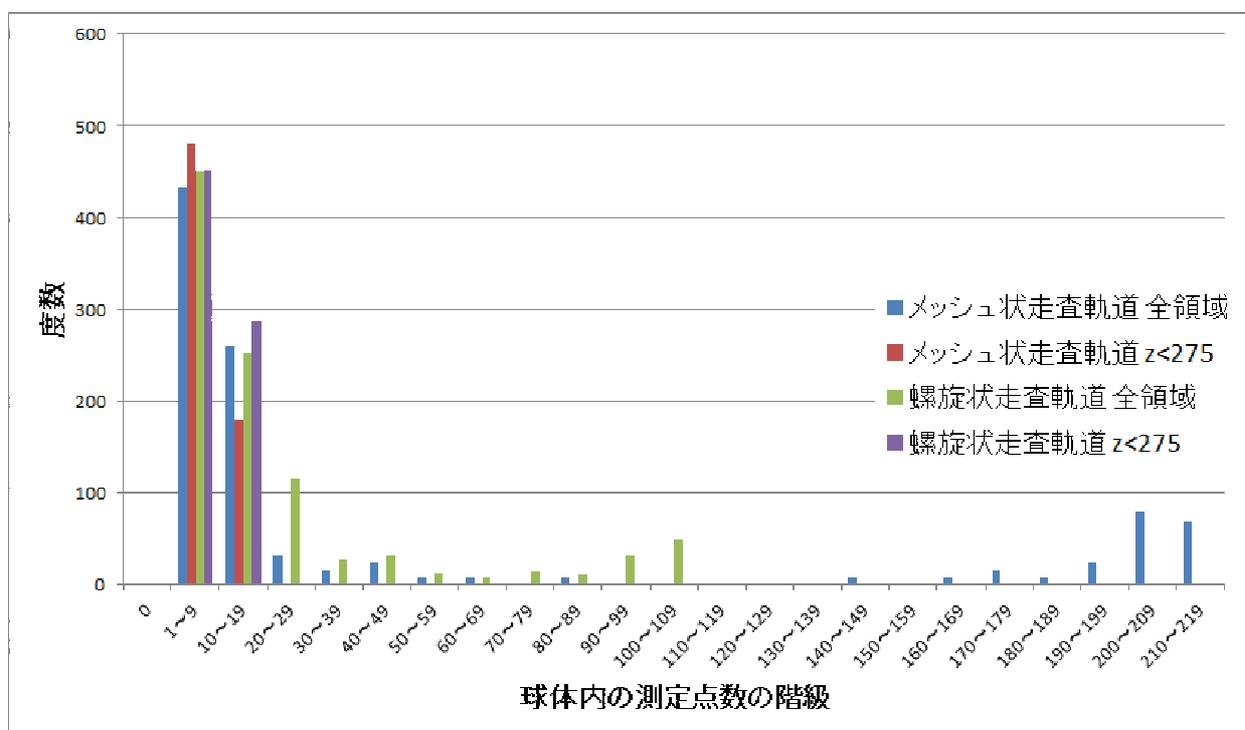


図 3.8: $r_p = 50$ における N_i のヒストグラム

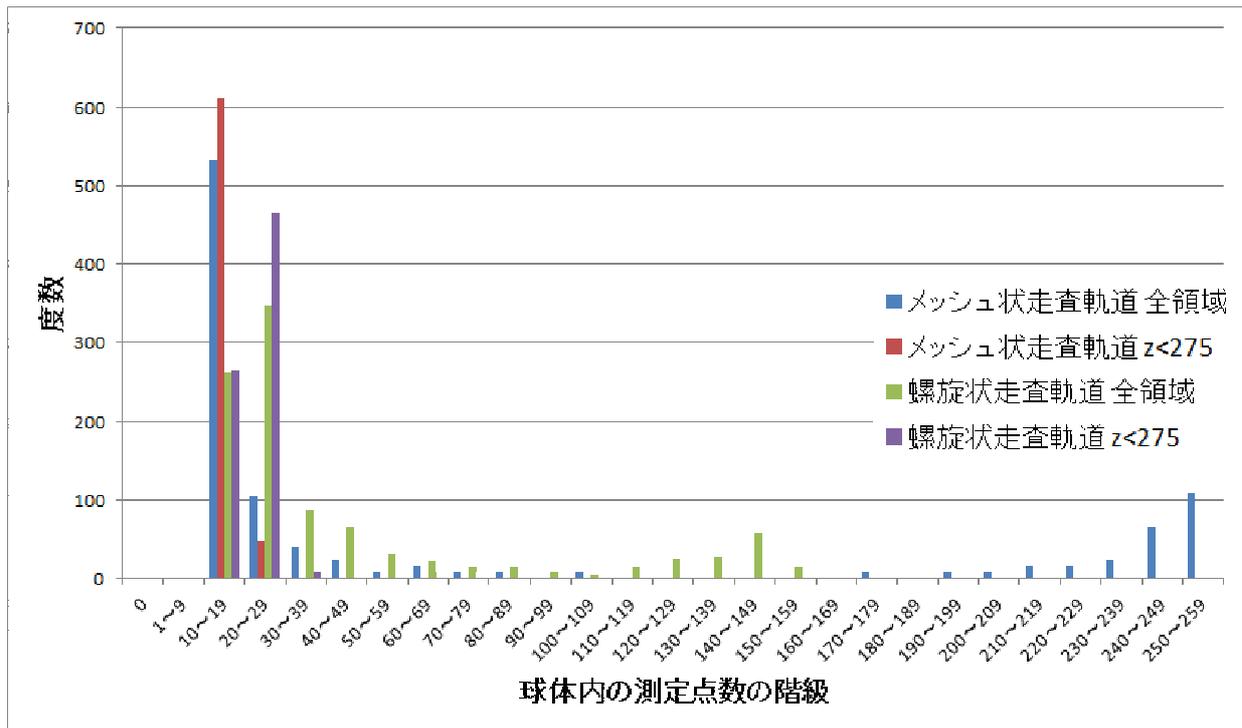


図 3.9: $r_p = 70$ における N_i のヒストグラム

3.6 z座標を制限した N_i に関するシミュレーションについての考察

z座標の制限によって、対象となる測定点数はメッシュ状走査軌道の方が螺旋状走査軌道よりも少なくなった。この結果は、z座標が大きい領域に存在する測定点の数は、メッシュ状走査軌道の方が多いことを示している。

$z < 275$ の測定点のみを対象としたことによって、 N_i が比較的大きな階級に属する測定点 P_i が存在しなくなり、右肩下がりのヒストグラムとなっていることが確認できる。この結果は、すべての測定点を対象としたシミュレーションにおいて存在した N_i が大きな P_i が、z座標が大きな領域における測定点の密集に起因するものであり、3.4節での予測が正しいことを示している。

メッシュ状走査軌道と螺旋状走査軌道について、z座標を制限したシミュレーション結果に着目して比較する。 $r_p = 50$ のシミュレーションにおいて、 $10 \leq N_i \leq 19$ となった P_i の割合はメッシュ状走査軌道で約27%であるのに対して、螺旋状走査軌道では約39%である。また $r_p = 70$ のシミュレーションにおいて、 $20 \leq N_i \leq 29$ となった P_i の割合はメッシュ状走査軌道で約7%、螺旋状走査軌道では約63%となる。以上の結果より、 N_i が大きな P_i の割合は螺旋状走査軌道の方が大きくなる傾向が確認できる。しかしながら $r_p = 10$ のシミュレーションにおいては、 $1 \leq N_i \leq 9$ となった P_i がメッシュ状走査軌道では約20%存在する一方で、螺旋状走査軌道ではすべての P_i において $N_i = 0$ となる。これは螺旋状走査軌道の軌道間の死角に球体が入り込むことに起因した結果であり、軌道間の死角が原

因となる測定能力の低下が発生することを示唆するものである。

3.3節および3.5節で行ったシミュレーションの結果を総合し、メッシュ状走査軌道と螺旋状走査軌道を N_i に着目して比較する。各シミュレーションによって得られた N_i の平均値を表 3.3 に示す。 $z < 275$ となる領域においては N_i が大きな P_i の数は螺旋状走査軌道の方が多くなる傾向が見られるものの、全領域においてはメッシュ状走査軌道の方が多くなっている。また N_i の値そのものについても、メッシュ状走査軌道の最大値は螺旋状走査軌道の最大値よりも 1.5~2 倍程度大きくなっている。これらの結果より、 z 座標が大きな領域における測定点の密集はメッシュ状走査軌道の方が顕著であると推測されるため、これらの領域においては螺旋状走査軌道と比較して高い測定能力が期待できる。一方で z 座標が小さくない領域における測定点の密集は螺旋状走査軌道の方が顕著となる傾向が見られるため、これらの領域においてはメッシュ状走査軌道よりも高い測定能力を得ることができると予測される。しかしながら測定対象が小さい場合は、対象が軌道間の死角に入り込んでしまうため十分な測定能力を得ることができないと考えられる。

表 3.3: 各シミュレーションにおける N_i の平均値

対象走査軌道	対象領域	球体半径 r_p		
		10	50	70
メッシュ状走査軌道	全領域	9.332	52.316	76.692
	$z < 275$	0.921	7.927	15.988
螺旋状走査軌道	全領域	0.566	22.936	43.846
	$z < 275$	0	9.794	21.061

3.7 $d_{i,k}$ の標準偏差 σ_i に関するシミュレーション

球体の中心から各測定点までの距離 $d_{i,k}$ の標準偏差 σ_i に関するシミュレーションを行うことによって、球体内部における測定点 P_j の分布を検証した。シミュレーション条件を表 3.4 に示す。

シミュレーションによって得られた、 P_i の z 座標と σ_i の関係を図 3.10 および 3.11 に示す。どちらの軌道においても r_p の値に関わらず共通の傾向が確認でき、 σ_i の値については $r_p = 70$ の方が大きくなっている。メッシュ状走査軌道のシミュレーション結果に着目すると、 z が 50~275 付近の領域において σ_i が大きく変動していることが確認できる。また z が 300 付近の領域において、 σ_i の値が急増している。これに対して螺旋状走査軌道では、 z が 0~275 付近の領域において σ_i が緩やかかつ階段状に変動するという、メッシュ状走査軌道とは異なる傾向が見られる。その一方で、 $z = 300$ 付近の領域における σ_i の急増という共通した傾向についても確認される。

P_i の z 座標と σ_i の関係について、軌道間の比較を行う。 $r_p = 50$ のシミュレーション結果を図 3.12、 $r_p = 70$ のシミュレーション結果を図 3.13 にそれぞれ示す。 σ_i の値については、メッシュ状走査軌道の方が全体的に大きくなる傾向が確認できる。

球体内部の測定点数 N_i と σ_i の関係を図 3.14 および 3.15 に示す。メッシュ状走査軌道では、 N_i がおよそ 30 より小さい領域で σ_i が発散する一方、 N_i が大きな領域では σ_i が収束しており、これは $r_p = 50$ と $r_p = 70$ に共通した傾向である。 N_i が発散する領域における σ_i の発散の度合については、 $r_p = 50$ の方が大きくなっている。螺旋状走査軌道も $r_p = 50$ と $r_p = 70$ で同様の傾向を示しており、全領域で σ_i の値は収束している。

表 3.4: σ に関するシミュレーション条件

対象走査軌道	n	r_p
メッシュ状走査軌道	1000	50
		70
螺旋状走査軌道	1000	50
		70

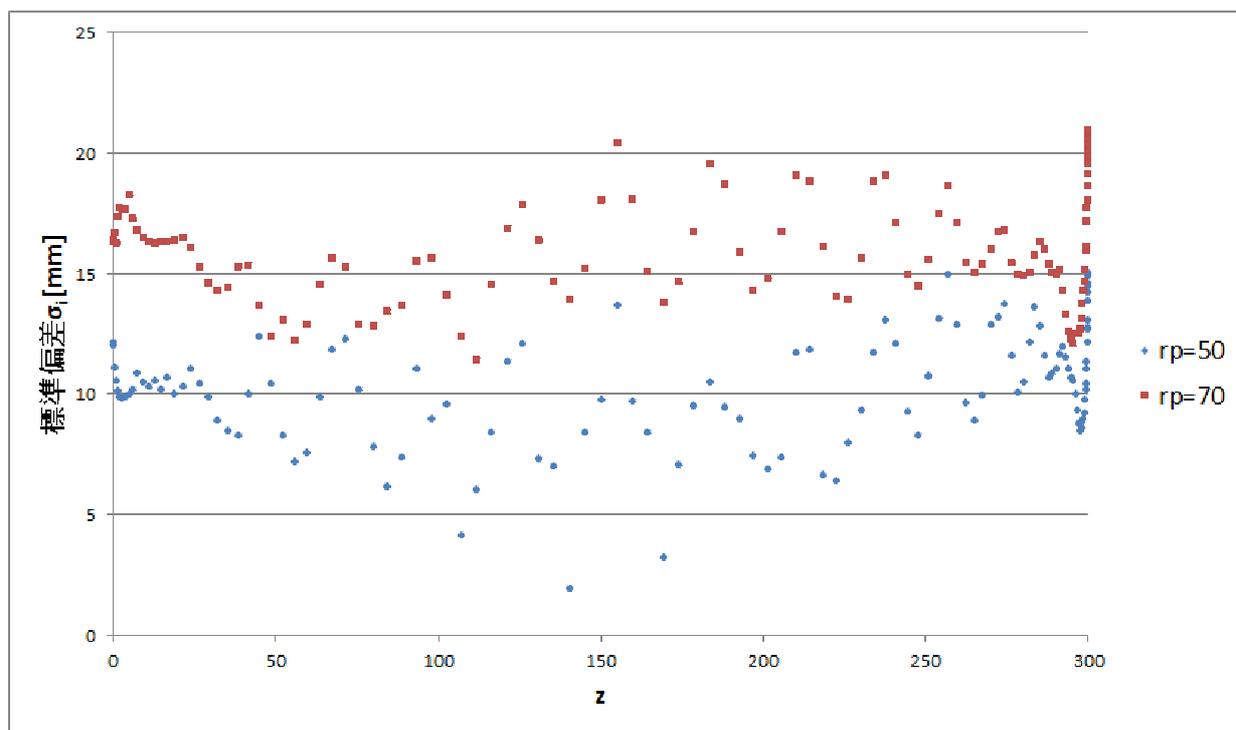


図 3.10: メッシュ状走査軌道における z 座標と σ_i の関係

3.8 σ_i に関するシミュレーションについての考察

図 3.10 および 3.11 に着目すると、 z が 30~275 付近の領域における σ_i の分布はメッシュ状走査軌道と螺旋状走査軌道で大きく異なることが確認できる。このような結果となる要

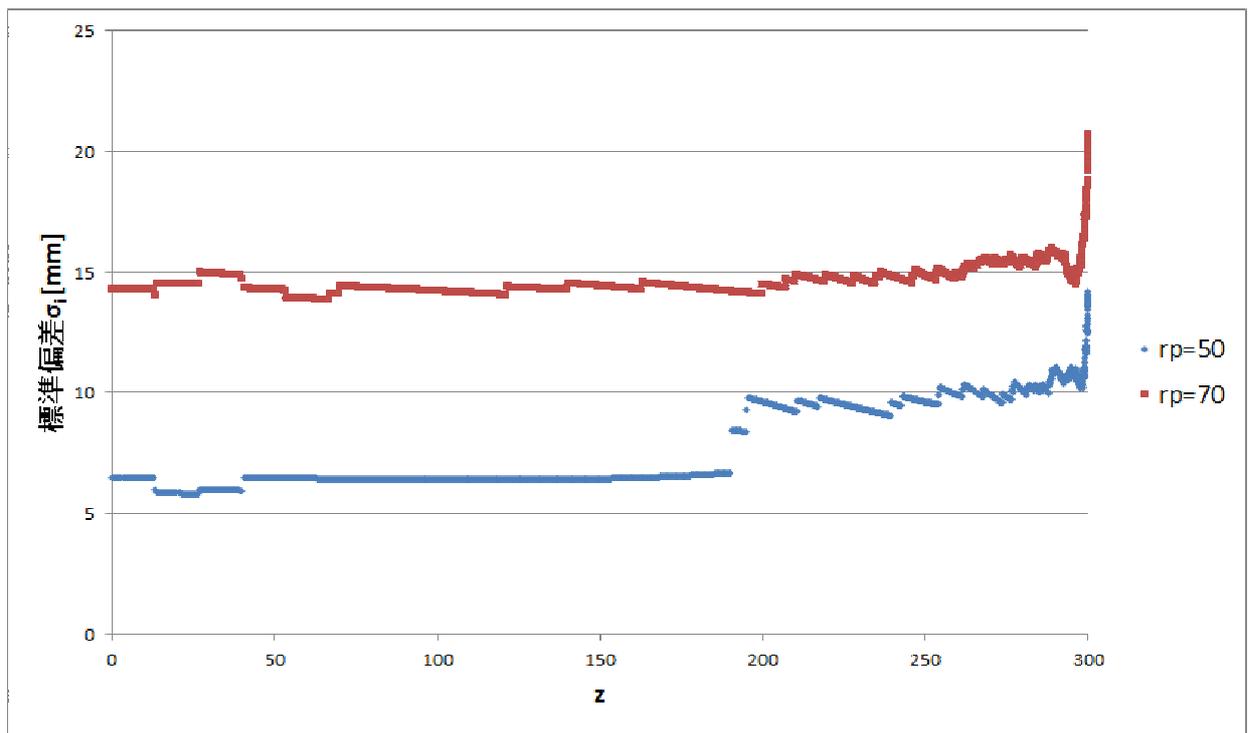


図 3.11: 螺旋状走査軌道における z 座標と σ_i の関係

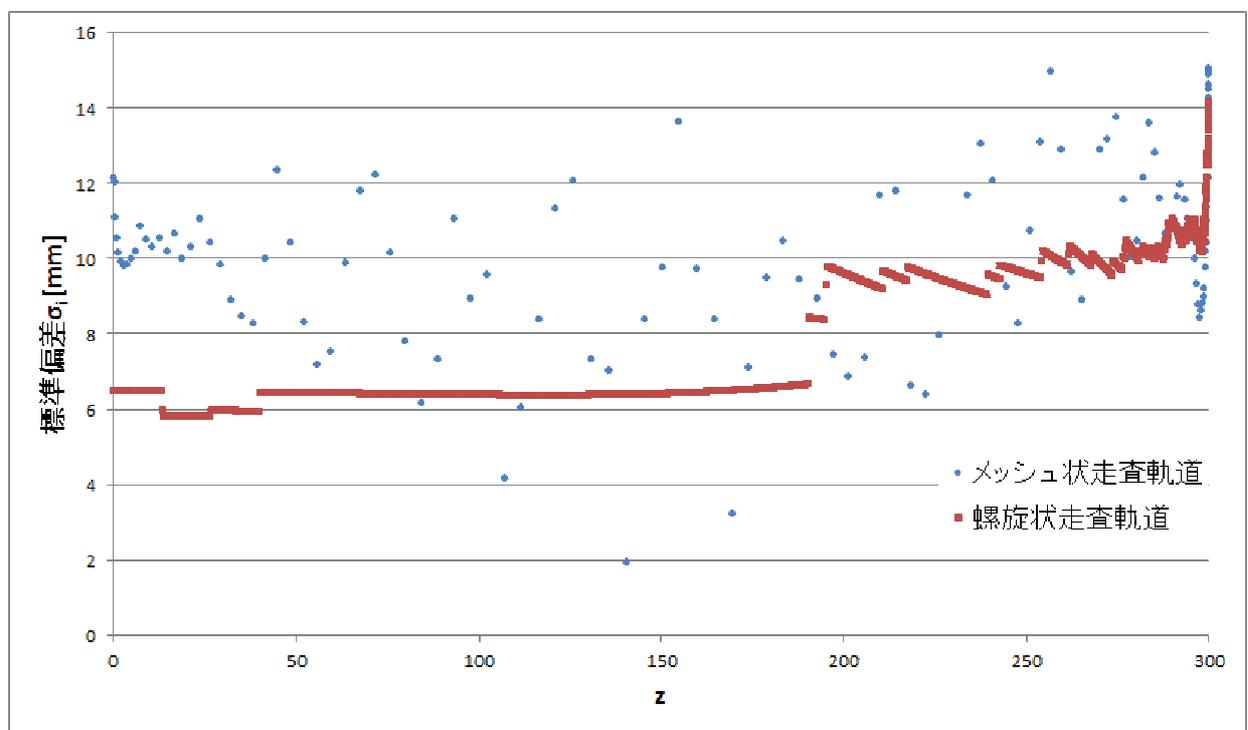


図 3.12: $r_p = 50$ における z 座標と σ_i の関係

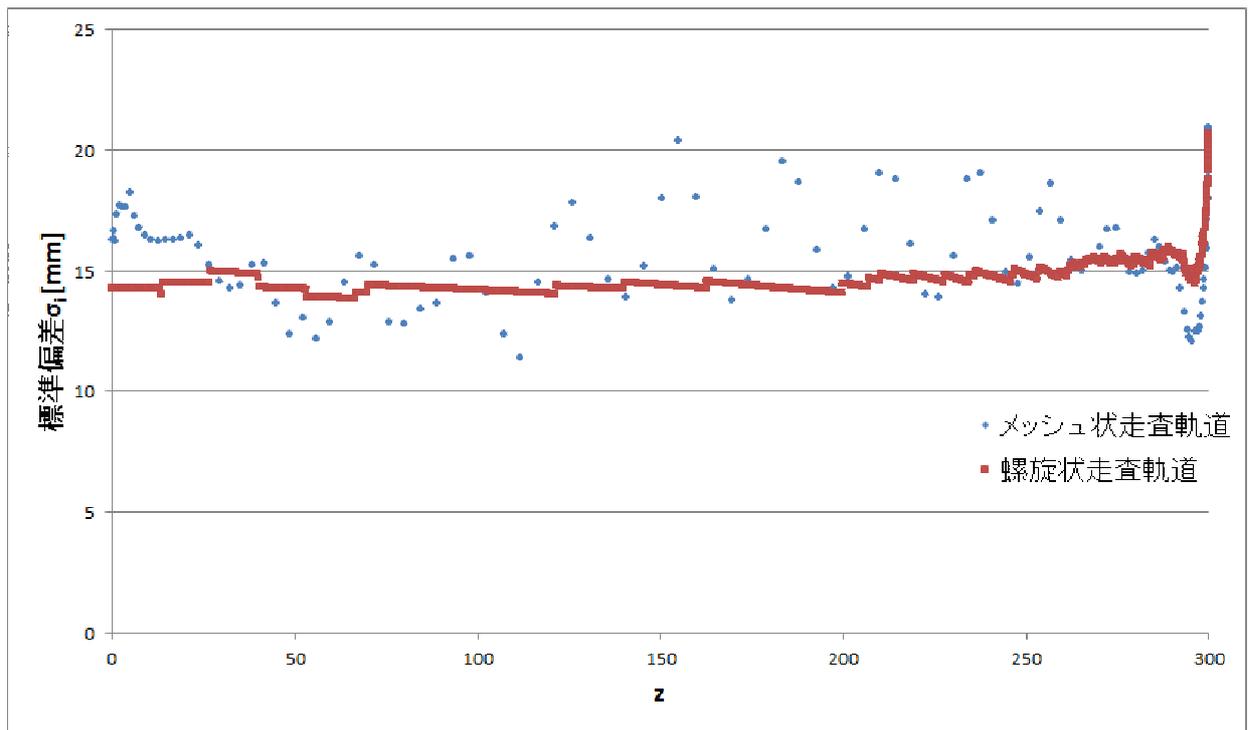


図 3.13: $r_p = 70$ における z 座標と σ_i の関係

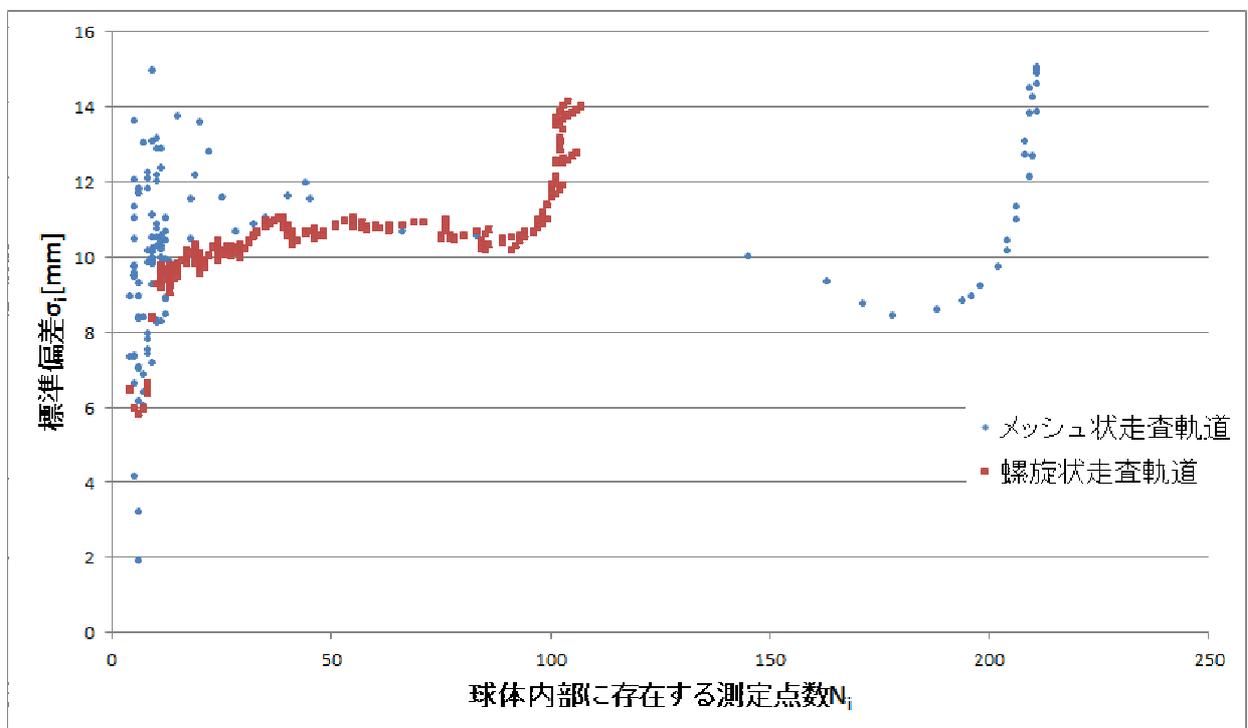


図 3.14: $r_p = 50$ における N_i と σ_i の関係

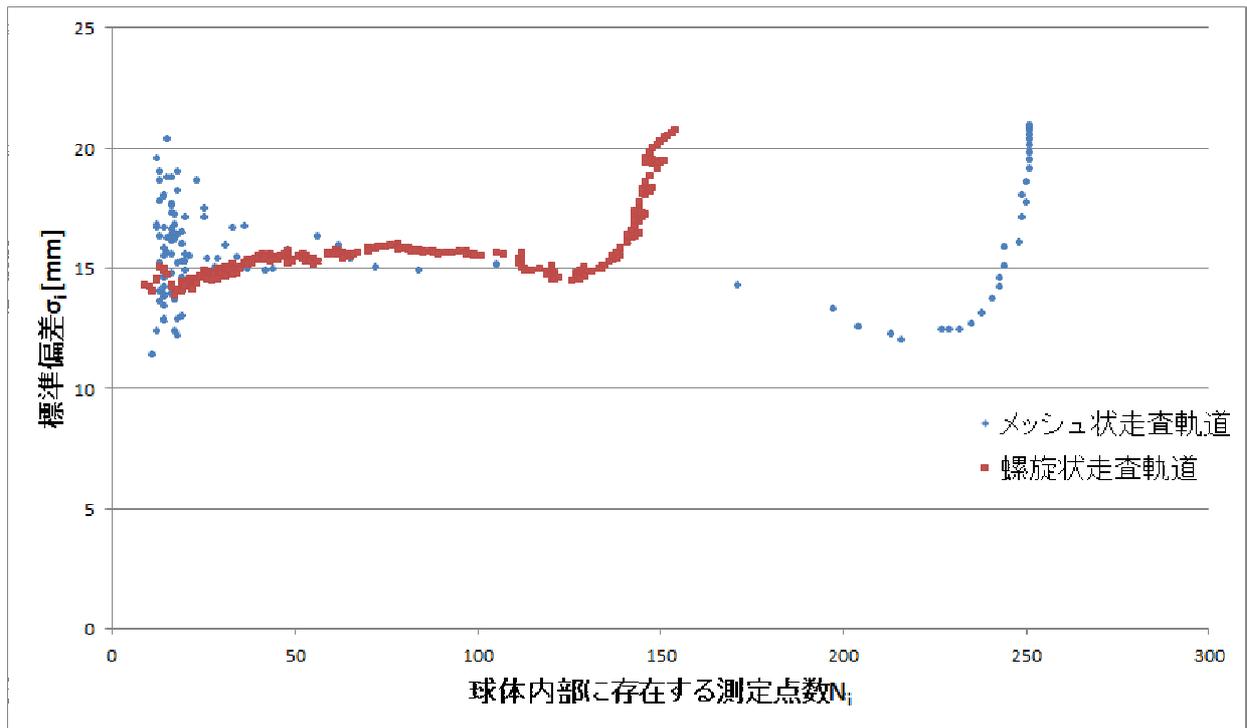


図 3.15: $r_p = 70$ における N_i と σ_i の関係

因の1つとして、球体が切り取る軌道形状の違いが考えられる。メッシュ状走査軌道における球体と軌道の関係のモデルを図 3.16 に示す。メッシュ状走査軌道では、球体に切り取られる軌道の形状が z 座標の小さな変化によって大きく変化する。測定点は軌道上に存在するため、切り取られる軌道形状の変化は測定点の分布の変化へと繋がり、結果として標準偏差が大きく変動すると推測される。螺旋状走査軌道における球体と軌道の関係のモデルを図 3.17 に示す。螺旋状走査軌道では、球体に切り取られる軌道形状は z 座標の小さな変化ではほぼ不変である。そのため測定点の分布に影響する要因としては軌道間隔および軌道半径が支配的となり、標準偏差が緩やかかつ階段状に変動すると考えられる。 z が 300 付近の領域において σ_i が急増するという共通の傾向については、測定点が密集する領域であるため N_i が増加することが原因と推測される。

図 3.14 および 3.15 に着目する。メッシュ状走査軌道と螺旋状走査軌道の最も大きな相違点は、 N_i が 0~30 付近の領域における σ_i の分布である。メッシュ状走査軌道における σ_i の発散は、同じ測定点数 N_i においても測定点の分布は大きく異なり多様であることを示している。その一方で螺旋状走査軌道では σ_i が収束しており、これは測定点の分布が N_i にほぼ依存し、 N_i が同じ場合は画一的な分布となることを示唆している。このような傾向を示す要因の1つとしては、前述した球体に切り取られる軌道形状の変化の大きさが挙げられる。

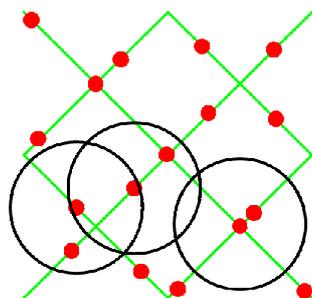


図 3.16: メッシュ状走査軌道における球体と軌道の関係モデル

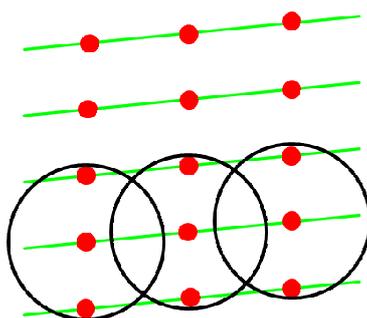


図 3.17: 螺旋状走査軌道における球体と軌道の関係モデル

3.9 シミュレーション結果に基づいた走査軌道の評価

以上のシミュレーション結果をもとに、メッシュ状走査軌道および螺旋状走査軌道の性質について評価を行う。メッシュ状走査軌道は螺旋状走査軌道と比較して、球体内部に存在する測定点数 N_i の平均値が大きくなる傾向が見られた。これは z 座標が大きい領域に N_i が大きな P_i が集中して分布していることに起因しており、それ以外の領域については螺旋状走査軌道よりも N_i が小さくなった。その一方で球体内部の測定点の分布については、 z 座標が大きくない領域において分散かつ多様となった。この領域における測定点数は螺旋状走査軌道より少ない傾向にあるため測定の詳細さについては劣るものの、測定点が広範囲に分布しているため概形の認識を目的とした測定においては有利であるといえる。また z 座標が大きな領域については N_i が螺旋状走査軌道と比較して 1.5~2 倍程度と大きくなったため、測定の詳細さについても優位性がある。

螺旋状走査軌道については、 z 座標が大きくない領域において N_i がメッシュ状走査軌道を上回る傾向が見られ、球体内部の測定点の分布は集中していることが確認できた。また球体内部の測定点数が同じ場合、測定点の分布についても同様となる傾向が見られた。そのため局所的な測定の詳細さについてはメッシュ状走査軌道よりも優れている。螺旋状走査軌道では測定点の分布がほぼ水平に集中しているため、水平方向に詳細な測定を行うことが可能である。しかしながら垂直方向の測定点の分布間隔が広くなる傾向があるため、垂直方向の測定能力は水平方向に対して大きく劣ってしまう。

第4章 3次元走査装置の開発

4.1 3次元走査装置の概要

2章で提案したメッシュ状走査軌道を用いて空間を走査する3次元走査機構を開発した。パン方向の回転とチルト方向の往復回転運動を、回転方向の制御を必要としない単一のモータのみを動力として実現した。本研究で開発した3次元走査機構の外観図を図4.1に、断面図を図4.2にそれぞれ示す。主要な構成要素を表4.1にまとめる。表中の要素番号は図4.1および4.2の図中番号に対応する。本研究で開発した3次元走査機構は、機能的に3つの機構部に分類することができる。1つ目は「回転動力生成機構」であり、モータによって生み出される回転動力を回転板より上の構成要素へと伝達する機構である。2つ目は「回転数変換機構」であり、所望の走査領域を持った単位走査軌道を実現するために、回転動力生成機構から伝達された回転動力を適切な回転数へ変換する機構である。3つ目は「往復回転運動生成機構」であり、回転数変換機構から受け取った回転動力をもとにアームの往復回転運動を実現する機構である。以下各機構の詳細について述べる。

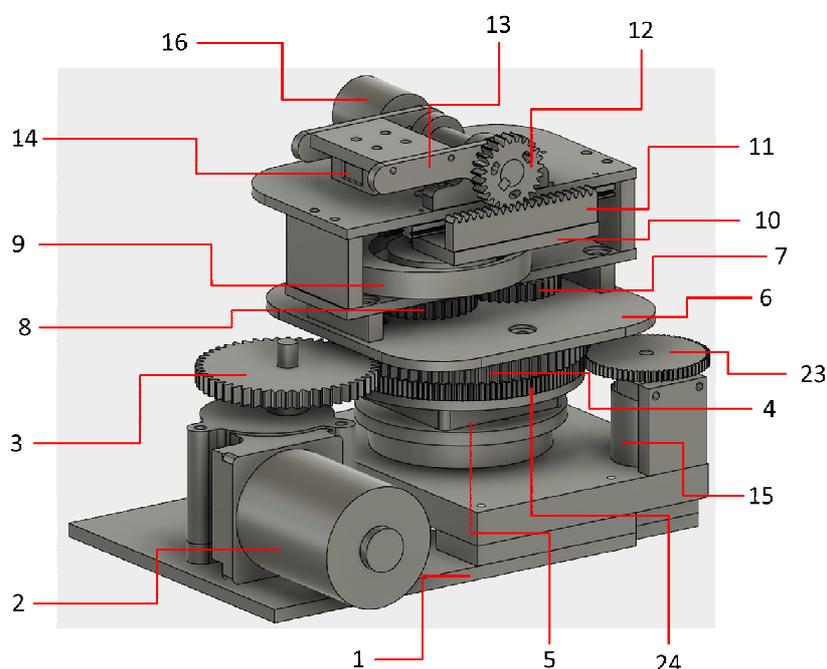


図 4.1: 3次元走査機構の外観図

表 4.1: 3次元走査機構の主要な構成要素

要素番号	要素名
1	ベース板
2	DCギアドモータTP-3644L-KW-125
3	ギヤM
4	ギヤP
5	スリップリング SRG-42-8GC
6	回転板
7	ギヤC
8	ギヤD
9	カム
10	スライド板
11	ラック
12	ギヤE
13	アーム
14	レーザ測距センサ LIDAR-Litev2
15	ロータリーエンコーダ MAS-17-1024-G1
16	ロータリーエンコーダ MAH-17-1024-G1
17	ギヤA
18	ギヤB
19	軸材A
20	軸材B
21	軸材C
22	カムフォロア CFS2.5V
23	ギヤSS
24	ギヤSL

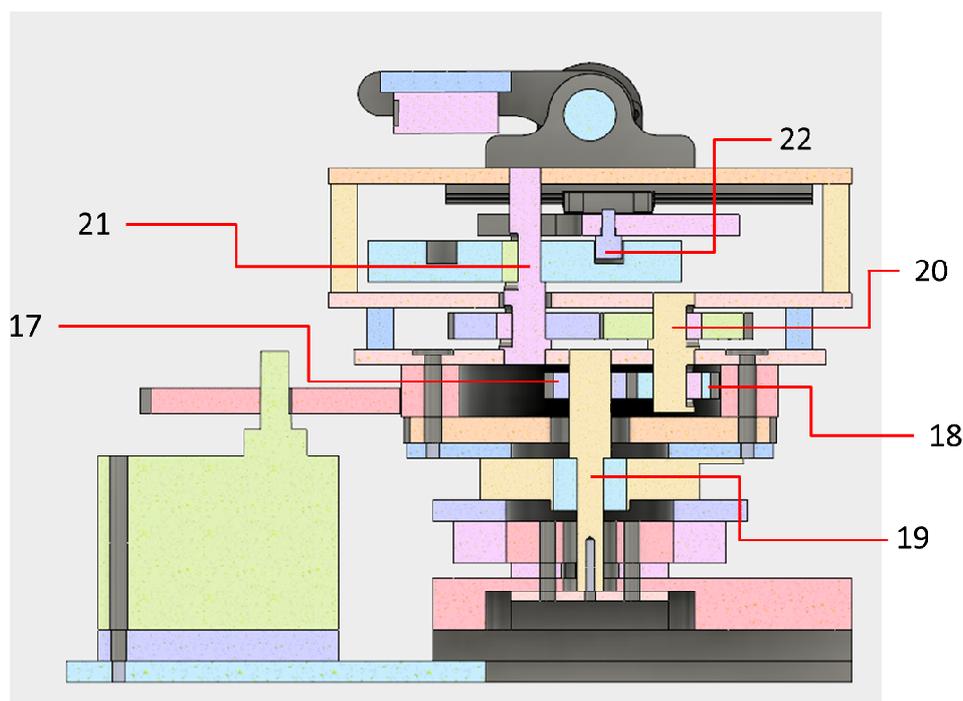


図 4.2: 3次元走査機構の断面図

4.2 回転動力生成機構の概要

回転動力生成機構を構成する主要要素を表 4.2 に示す．ギヤ A は軸材 A に対して回転しない状態で固定され，軸材 A はベース板に対して回転しないように固定される．そのためギヤ A は回転板に対して完全に固定される形となり，ギヤ A 自身は回転しない構造となる．軸材 A の先端は回転板の中心に開けられた穴に挿入されるため，回転板は軸材 A を回転軸として回転することができる．回転板には回転軸が一致する形でギヤ P が固定され，ギヤ M を介して DC ギアドモータ TP-3644L-KW-125(以下，モータと記述)へ接続される．すなわち，モータの回転に伴って回転板が軸材 A を軸に回転する構造となる．

ギヤ B は軸材 B に対して回転しない形で固定され，ギヤ A とかみ合うように配置される．軸材 B は回転板に開けられた穴に対して回転することができる状態で挿入されるため，回転板の回転に伴ってギヤ B はギヤ A の周囲を回転しながら移動することになる．このときのギヤ A とギヤ B の関係を表したモデルを図 4.3 に示す．回転板が角度 θ_1 回転した場合のギヤ B の絶対的回転角度は θ_2 であるが，ギヤ B 自身が回転板の回転に合わせて軸材 A を中心とした円運動を行うため，回転板に対する相対的な回転角度は $\theta_2 - \theta_1$ となり式 (4.1) によって得られる．

$$\theta_1 - \theta_2 = \frac{Z_a}{Z_b} \theta_1 = f_{\theta_1}(\theta_1) \quad (4.1)$$

式 (4.1) 中に表れる Z_a および Z_b は，それぞれギヤ A，ギヤ B の歯数である．ギヤ B は軸材 B に固定されているため，回転動力生成機構によって生み出された動力は軸材 B を介して回転数変換機構へ伝達される．

表 4.2: 回転動力生成機構の主要な構成要素

要素番号	要素名
1	ベース板
2	DCギアドモータTP-3644L-KW-125
3	ギヤM
4	ギヤP
5	スリップリング SRG-42-8GC
6	回転板
17	ギヤA
18	ギヤB
19	軸材A
20	軸材B

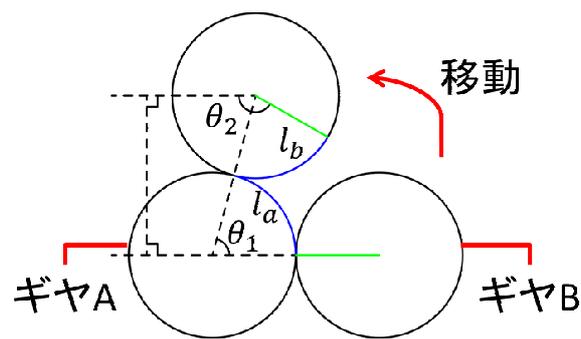


図 4.3: ギヤ A とギヤ B の関係モデル

4.3 回転数変換機構の概要

回転数変換機構の主な構成要素を表 4.3 に示す。ギヤ C は軸材 B に対して回転しない形で固定されるため、回転動力生成機構から伝達された動力によって回転する。ギヤ D は軸材 C に対して回転しないように固定され、ギヤ C とかみ合うように配置される。このときのギヤ C とギヤ D の関係モデルを図 4.4 に示す。ギヤ C の回転角度 θ_3 が $\theta_2 - \theta_1$ と等しいことを考慮すると、ギヤ D の回転角度 θ_4 は式 (4.2) によって得られる。

$$\theta_4 = \frac{Z_c}{Z_d} \theta_3 = \frac{Z_c Z_a}{Z_d Z_b} \theta_1 = f_{\theta_4}(\theta_1) \quad (4.2)$$

式 (4.2) 中に表れる Z_c および Z_d は、それぞれギヤ C、ギヤ D の歯数である。ギヤ D は軸材 C に固定されているため、回転数に変換された動力は軸材 C を介して往復回転運動生成機構へ伝達される。

表 4.3: 回転数変換機構の主要な構成要素

要素番号	要素名
7	ギヤC
8	ギヤD
20	軸材B
21	軸材C

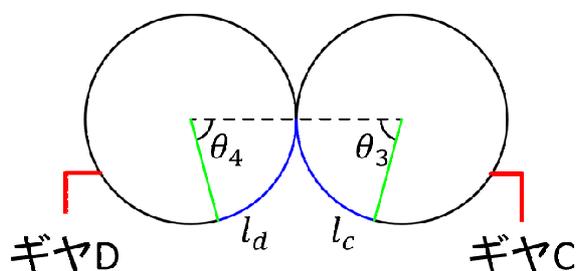


図 4.4: ギヤ C とギヤ D の関係モデル

4.4 往復回転運動生成機構の概要

往復回転運動生成機構の構成要素を表 4.4 に示す。回転数変換機構から伝達された動力は、カムおよびカムフォロアによってスライド板の往復直線運動に変換される。カムの面には図 4.5 に示す円形の溝が掘られており、その溝にカムフォロアが挿入される。スライド板の可動範囲と平行な直線 L_n と溝の中心線の交点を P_C とする。カムの回転軸と溝を構成する円の中心は一致していないため、カムの回転運動によって P_C は図 4.6 に示すよ

うに2点間を往復する． P_C の運動はカムフォロアの運動と一致するため，カムフォロアが固定されたスライド板は往復直線運動を行うことになる．単位走査軌道の実現を考えると，パン方向の走査領域の走査を完了，すなわち回転板が角度 θ_p 回転した際に，カムは360度回転する必要がある．

スライド板はラックおよびギヤEを介してアームと接続されているため，スライド板の移動に合わせてギヤEが回転，すなわちアームの角度が変化することになる．ラックとギヤEの関係を示したモデルを図4.7に示す．ラックの移動距離とギヤEの回転距離が等しいことを考えると，回転板の回転とギヤEの往復回転運動には式(4.3)の関係が成り立つ．

$$\frac{L}{2} \sin \left\{ 360 \frac{f_{\theta_4}(\theta_1)}{f_{\theta_4}(\theta_p)} \right\} = \frac{\theta_5}{360} \pi Z_e m_3 \quad (4.3)$$

式(4.3)中に表れる Z_e はギヤEの歯数， m_3 はギヤEのモジュールである．

スライド板が可動範囲を往復直線運動するのに合わせて，ギヤEは角度 $\theta_t/2$ を基準として，角度0から θ_t の範囲を往復回転運動する．これを考慮すると，スライド板が可動範囲の限界まで移動した際のギヤEの回転角度は $\theta_t/2$ となるため，式(4.4)の関係が成り立つ．

$$L = \frac{\theta_t}{360} \pi Z_e m_3 \quad (4.4)$$

式(4.4)はチルト方向の走査領域がギヤEの歯数とモジュール，スライド板のスライド幅に依存することを示している．本研究では円形の溝が掘られたカムによって往復直線運動を実現しており，図4.5中の L がスライド幅に対応する．

以上の原理によって，回転方向の制御を必要としない単一モータのみによって，回転板のパン方向の回転とアームのチルト方向の往復回転運動を実現している．アームは回転板に固定される構造であるため，アームの先端は単位走査軌道を描くことになる．アームの先端に検出部を機構の外側へ向ける形でレーザ測距センサ LIDAR-Lite v2(以下，レーザ測距センサと記述)を搭載することによって，単位走査軌道による外部環境の測定を行うことが可能となる．3次元走査機構の動作フローを図4.8，動作イメージを図4.9にそれぞれ示す．

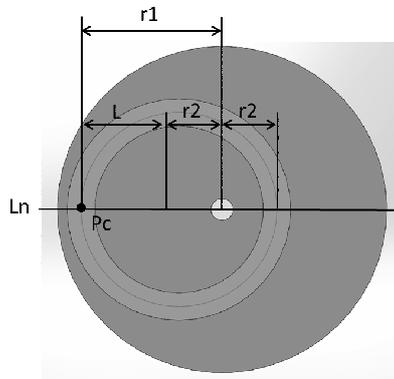


図 4.5: カムの構造

表 4.4: 往復回転運動生成機構の主要な構成要素

要素番号	要素名
9	カム
10	スライド板
11	ラック
12	ギヤE
13	アーム
21	軸材C
22	カムフォロア CFS2.5V

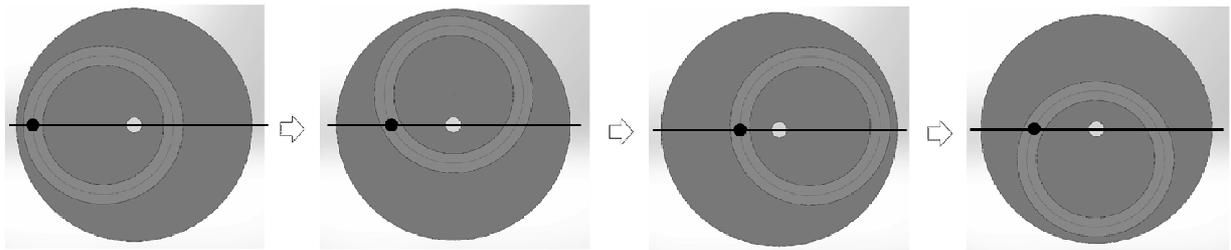


図 4.6: カムの回転に伴う P_C の移動

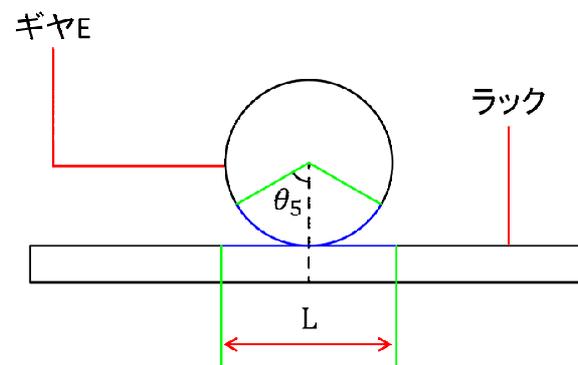


図 4.7: ラックとギヤ E の関係モデル

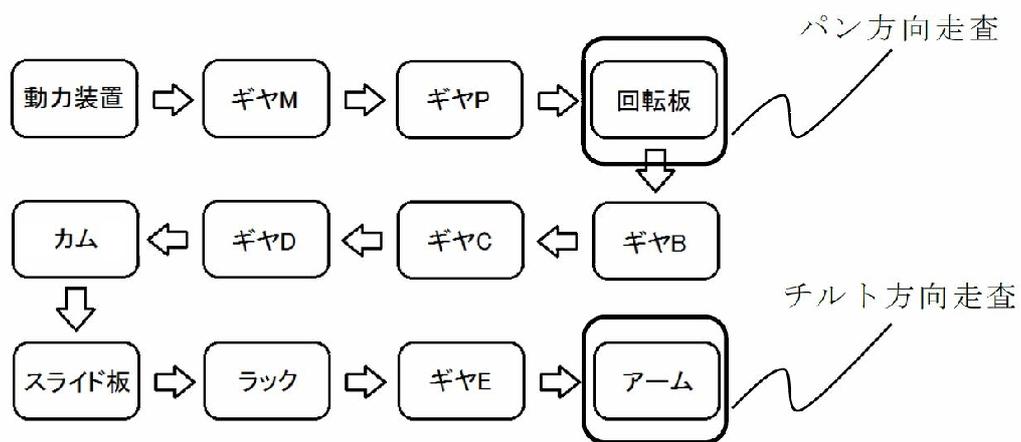


図 4.8: 3次元走査機構の動作フロー

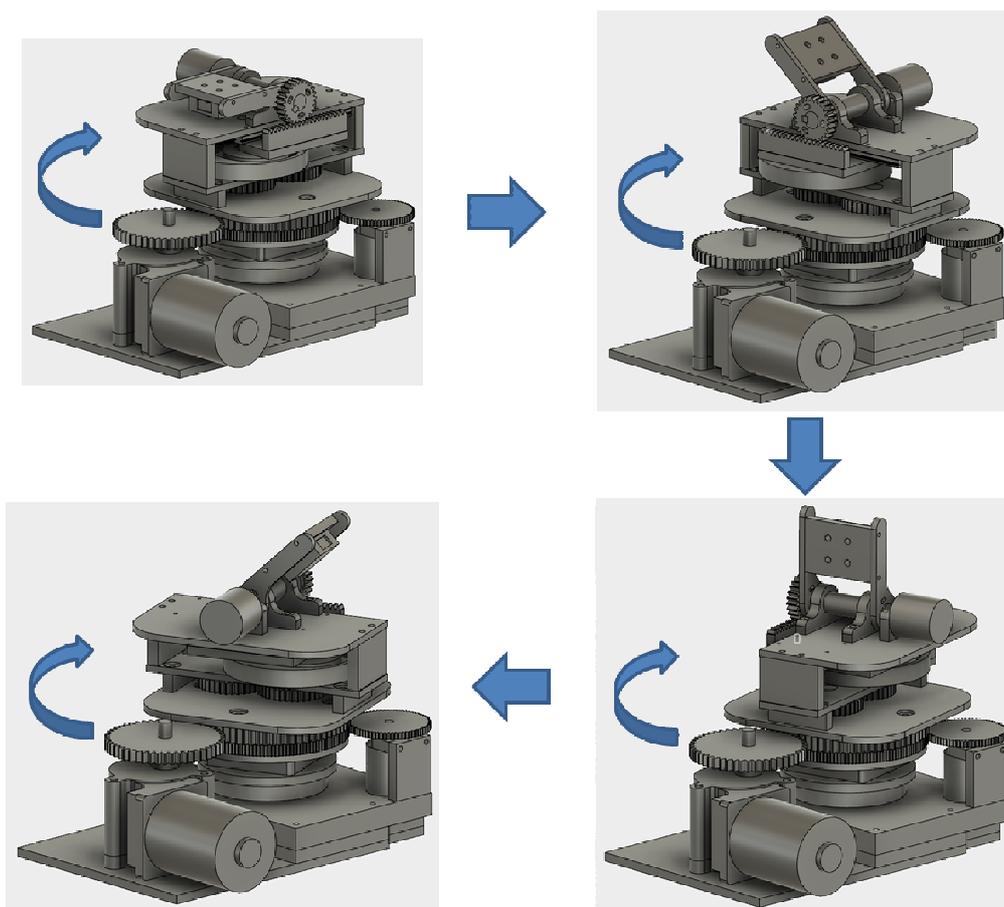


図 4.9: 3次元走査機構の動作イメージ

4.5 各パラメータの決定

メッシュ状走査軌道を実現するためには，式(4.2)および(4.4)中の各パラメータを適切に選択する必要がある．回転板が角度 θ_p 回転する際にカムが360度回転する必要があることを考えると，ギヤA，ギヤB，ギヤCおよびギヤDの歯数が満たすべき条件として式(4.5)が得られる．

$$\frac{Z_c Z_a}{Z_d Z_b} = \frac{360}{\theta_p} \quad (4.5)$$

メッシュ状走査軌道は始端と終端が一致しない単位走査軌道によって実現されるため， θ_p は式(2.4)を満たす必要がある．以上の条件を踏まえて，本研究では以下に示す仕様を満たすように3次元走査機構を設計した．

- 走査領域は $z \geq 0$ の3次元空間
- $z = 0$ における水平方向の軌道間隔が，機構からの距離 r に対して20%以下

$$2\pi \frac{|\theta_p - 360|}{360} \leq 0.2 \quad (4.6)$$

これらの仕様と式(4.4)および(4.5)を考慮し，本研究では表4.5に示すパラメータを選択した．表4.5に示すパラメータに基づいて製作された3次元走査機構を図4.10および4.11に示す．

表 4.5: 3次元走査機構の各パラメータ

パラメータ名	パラメータ値
θ_p	350 [deg]
θ_t	90 [deg]
Z_a	20
Z_b	20
Z_c	36
Z_d	35
Z_e	25
m_3	0.8
L	5π [mm]

4.6 データの取得および処理

3次元走査機構における，データフローに関するブロック図を図4.12に示す．3次元走査機構では，データの取得および処理に2つのマイコン(AT-MEGA328P)を使用し，1

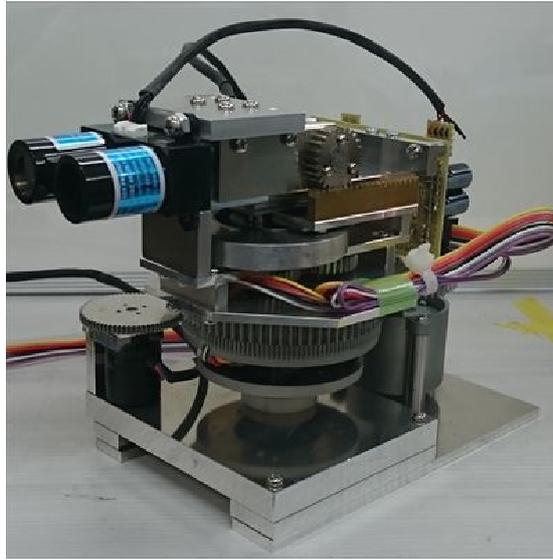


図 4.10: 3次元走査機構の概観 1

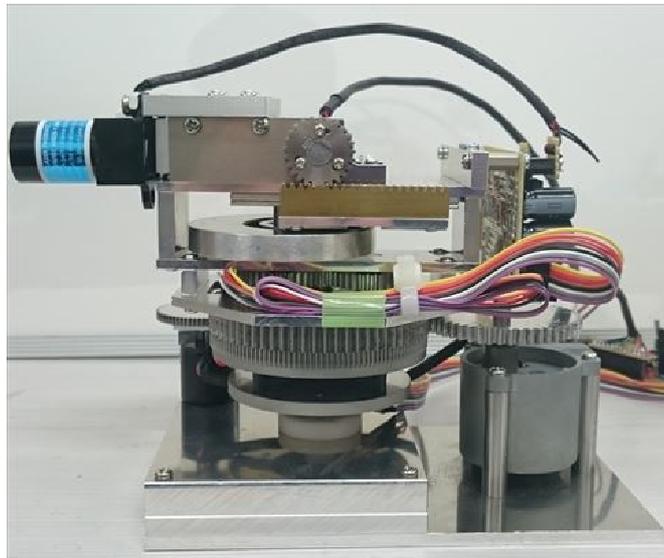


図 4.11: 3次元走査機構の概観 2

つはベース板側に、他方は回転板上に配置される。以下ベース板側に配置されるマイコンをマイコン1、回転板上に配置されるマイコンをマイコン2と記述する。マイコン1とマイコン2はシリアル通信の1つであるUSARTによって通信を行う。マイコン2は回転板と共に回転するが、スリップリングSRG-42-8GCを介してマイコン1と接続することによって、配線のねじれなどの物理的問題を伴わない接続を実現している。

レーザ測距センサを用いた距離データ取得はマイコン2によって行われる。マイコン2とレーザ測距センサはI2C通信によってデータをやり取りする。マイコン2がレーザ測距センサに対してデータ取得要求を送信することで、レーザ測距センサが距離の測定を開始する。距離データのデータ長は2Byteであり、マイコン2はレーザ測距センサの測定完了を待って距離データの取得を行う。

距離データ取得後、マイコン2は距離データ取得時点のアームの角度をロータリーエンコーダMAH-17-1024-G1(以下、ロータリーエンコーダ1と記述)より取得する。ロータリーエンコーダ1より得られる角度データは、10bitのグレイコードである。

AT-MEGA328Pにおいて、USARTで扱われるデータ長は8bitである。マイコン2はマイコン1に対して合計26bitのデータを送信する必要があるため、1度の通信ではすべてのデータを送ることはできない。本研究で開発した3次元走査機構では、表4.6に示す規則に従い距離データおよび角度データを分割することで、複数の8bitデータを生成する。マイコン1は上位3bitの値を比較することで受信したデータの種類を認識する。マイコン2が全データ送信後に送信するストップデータの上位3bitはデータ6の上位3bitと同じであるが、データ6の第4bitは常に0となるためストップデータと一致することはない。

ストップデータの受信を確認したマイコン1は、データ受信時点の回転板の角度をロータリーエンコーダMAS-17-1024-G1(以下、ロータリーエンコーダ2と記述)より取得する。ロータリーエンコーダ2より得られる角度データは、ロータリーエンコーダ1と同様に10bitのグレイコードである。

回転板の角度を取得後、マイコン1は距離、アーム角度、回転板角度のデータをPCへ送信する。マイコン1とPCはFT231X USBシリアル変換モジュールを介して接続されており、USARTを用いてデータを送信する。マイコン2と同様に、表4.7に示す規則に従ってデータを分割し、複数の8bitデータを生成する。データを受信したPCは、上位3bitを比較することで受信したデータの種類を判別し、データを再構成することで距離、アーム角度、回転板角度のデータを取得することができる。

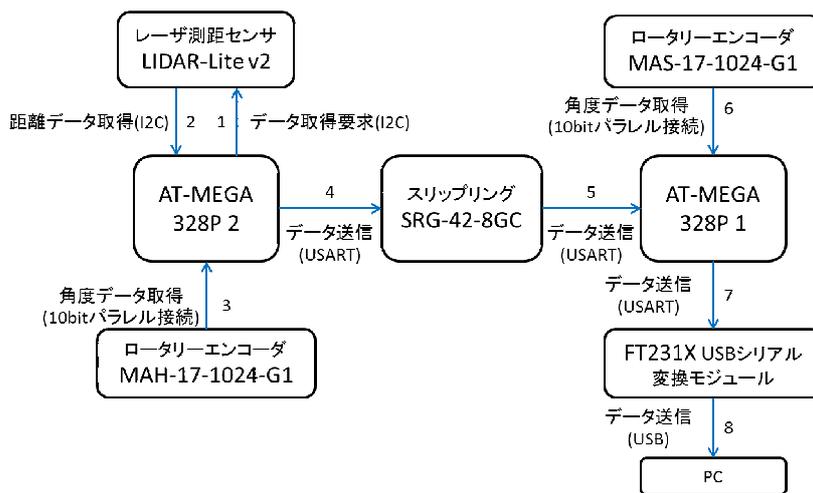


図 4.12: 3次元走査機構におけるデータフローのブロック図

表 4.6: マイコン2によって送信されるデータの構造

データ番号	上位3bit	下位5bit	備考
1	010	アーム角度データ下位5bit	
2	011	アーム角度データ上位5bit	
3	100	距離データ第0～3bit	第4bitは常に0
4	101	距離データ第4～7bit	第4bitは常に0
5	110	距離データ第8～11bit	第4bitは常に0
6	111	距離データ第12～15bit	第4bitは常に0
7	111	11111	全データ送信を示すストップデータ

表 4.7: マイコン1によって送信されるデータの構造

データ番号	上位3bit	下位5bit	備考
1	000	回転板角度データ下位5bit	
2	001	回転板角度データ上位5bit	
3	010	アーム角度データ下位5bit	
4	011	アーム角度データ上位5bit	
5	100	距離データ第0～3bit	第4bitは常に0
6	101	距離データ第4～7bit	第4bitは常に0
7	110	距離データ第8～11bit	第4bitは常に0
8	111	距離データ第12～15bit	第4bitは常に0
9	111	11111	全データ送信を示すストップデータ

第5章 3次元走査装置を用いた外部環境測定実験

5.1 予備実験の実施

本実験で使用するレーザ測距センサである LIDAR-Lite v2 の性能を実験により検証した。実験環境を図 5.1 に示す。レーザ測距センサから一定距離離れた地点に、地面に対して垂直になる形でパネルを設置した。パネルまでの距離、パネルのセンサに対する角度、パネル表面の色を変化させ、それぞれの条件において 1000 回の距離測定を行った。測定条件を表 5.1 に示す。

各距離における測定結果を表 5.2~5.4 に示す。25cm 離れたパネルに対する測定結果に着目すると、センサに対して 90 度の角度で設置されたパネルに対しては色に関わらずほぼ同じ値が測定されている。しかしパネルまでの距離が 25cm であるのに対して、測定された距離は約 33~34cm となっており、実際の距離よりも 8~9cm 程度大きな値となっていることが確認できる。パネルの角度を変化させた場合においても、黒を除く色については 90 度の場合とほぼ同じ値が得られた。その一方で、表面色が黒の場合については誤測定とみられる値がいくつか確認された。その結果として、平均値が実際の距離と乖離した値となっている。

50cm 離れたパネルに対する測定結果に着目すると、センサに対して 90 度の角度で設置されたパネルについては、25cm 離れたパネルに対する測定結果とほぼ同様の傾向を示している。実際の距離が 50cm であるのに対して、測定された距離は約 53.5~58cm となっており、測定値の方が 3.5~8cm 程度大きくなっている。パネルの角度を変化させた場合については、90 度に設置されたパネルに対する測定結果よりも大きな値が得られる傾向が見られる。特に 30 度の角度で設置したパネルに対する測定結果は色に関わらず 63~65cm 程度となっており、実際の距離よりも 15cm 近く大きな値となっている。パネル角度が 60 および 45 度の場合の測定結果が 56~60cm であることを考慮すると、パネル角度が 30 度になることによって実際の値との差異が顕著に大きくなっていることが確認できる。角度を変えたことによる測定値と実際の値との差異は表面色が黒のパネルにおいて最も大きくなっているものの、25cm 離れたパネルに対する測定で発生していた誤測定については確認されなかった。

100cm 離れたパネルに対する測定結果に着目する。測定された数値は 50cm 離れたパネルに対する測定結果とほぼ同様の傾向を示しており、実際の値との間に 4~10cm 程度の差異が確認できる。

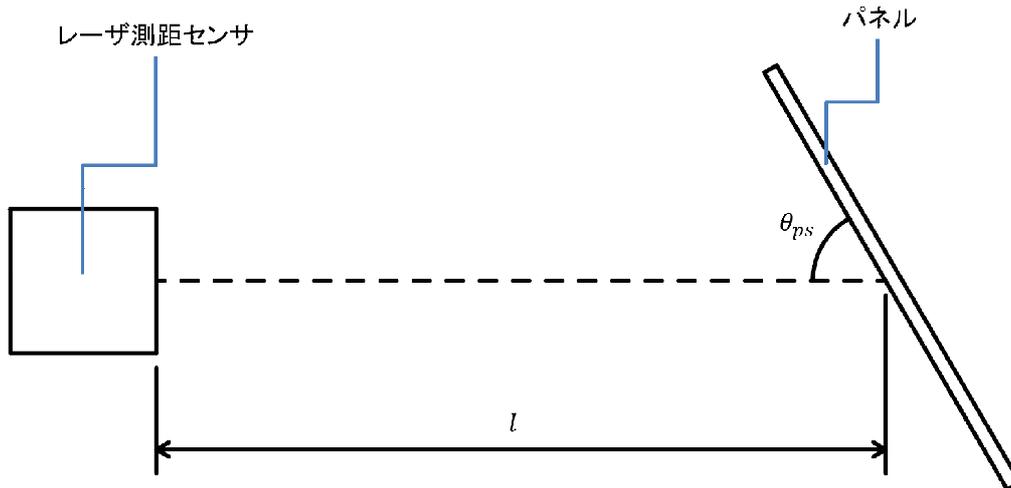


図 5.1: 予備実験の環境

表 5.1: レーザ測距センサの性能検証実験条件

パネルまでの距離 l	25, 50, 100 [cm]
パネルの角度 θ_{ps}	90, 60, 45, 30 [deg]
パネルの表面色	白, 黒, 赤, 青, 黄

表 5.2: レーザ測距センサから 25cm 離れたパネルに対する測定結果

色	パネル角度 [deg]			
	90	60	45	30
白	33.16	33.17	33.97	33.36
黒	33.21	74.52	235.01	254.94
赤	33.60	34.35	33.52	33.43
青	33.53	33.12	34.64	33.41
黄	33.95	33.67	32.25	33.47

表 5.3: レーザ測距センサから 50cm 離れたパネルに対する測定結果

色	パネル角度 [deg]			
	90	60	45	30
白	57.75	59.14	56.64	63.48
黒	54.79	60.53	62.50	65.34
赤	55.07	58.48	57.29	63.74
青	53.70	55.86	57.00	63.75
黄	54.30	56.42	56.72	63.53

表 5.4: レーザ測距センサから 100cm 離れたパネルに対する測定結果

色	パネル角度 [deg]			
	90	60	45	30
白	104.82	106.38	106.37	110.16
黒	103.77	110.41	110.37	115.59
赤	109.50	106.63	106.19	109.33
青	105.76	106.81	106.17	109.27
黄	106.30	107.27	106.72	109.15

5.2 予備実験結果の考察

予備実験の結果より、実際の距離よりは大きな値となるものの、黒以外の表面色のパネルについては本研究で使用するレーザ測距センサによる安定した測定が可能であることが確認できた。パネルのセンサに対する角度が 45~90 度である場合に限定すれば、測定された値と実際の距離の差異は 3.5~10cm 程度となった。その一方で、パネルがセンサに対して 30 度の角度で設置される場合は、他の角度で設置された場合よりも差異が大きくなる傾向が見られた。そのため測定対象とセンサの角度が鋭角になる場合については、差異が大きくなることを考慮する必要がある。実際の距離と測定値の間に差異が生じる原因としては、センサそのものの精度に加えて、周囲の明るさなどの環境的要因、センサの発光部と受光部の位置関係といった構造的要因などが考えられる。

表面色が黒のパネルの測定については、25cm 離れた地点に設置した場合に誤測定をいくつか含む測定となり、安定した値を得ることができなかった。また角度を変化させた場合、実際の距離と測定値との差異が他の色よりも多くなる傾向が確認できた。原因としては、黒が光を吸収する性質を持っているため、センサが送出したレーザ光がその影響を受けているためと考えられる。

5.3 実験の概要

本研究で開発した 3 次元走査機構を用いて外部環境の測定実験を行うことで、機構の有効性の検証および先行開発された機構との比較を行った。

はじめに、本研究で開発した 3 次元走査機構による測定が問題なく行われているか検証することを目的として、円筒状の囲いの内部に 3 次元走査機構を設置し、フタをした後に内部を測定する実験を行った。円筒状の囲いの直径は約 77cm、高さは約 94cm である。実験環境を図 5.2 に示す。

次に階段から一定距離離れた地点に 3 次元走査機構を設置し、外部環境を測定することで得られる測定点の分布を比較した。実験環境を図 5.3 に示す。階段の高さは 1 段あたり 18cm、階段から機構までの距離は 200cm である。なお階段と機構の距離は、機構に搭載されたレーザ測距センサの筐体の先端を基準とした。この実験は本研究で開発する機構だけではなく、先行開発された機構についても同様に行われた。結果を比較することによって、メッシュ状走査軌道と螺旋状走査軌道における測定点分布の相違点を検証した。

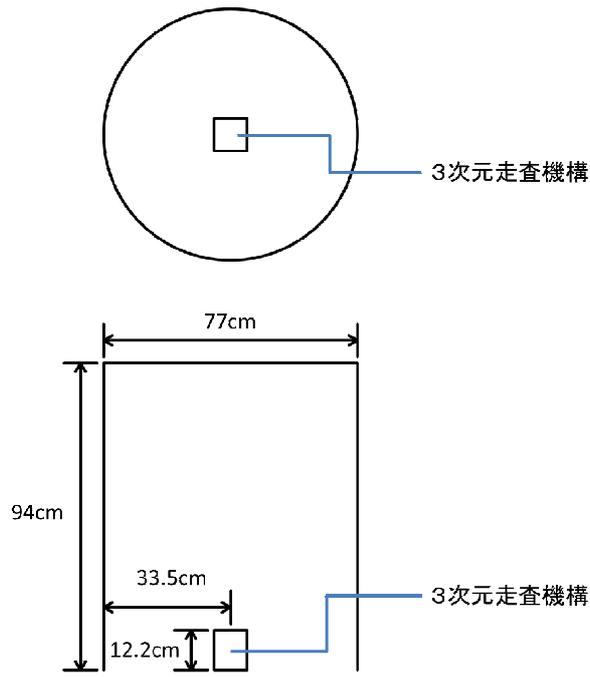


図 5.2: 円筒内部の測定実験環境

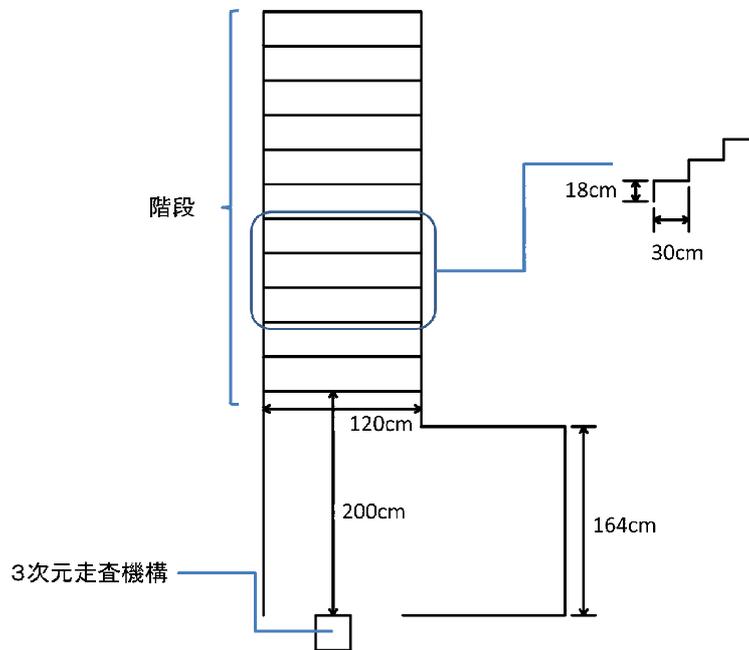


図 5.3: 階段形状の測定実験環境

5.4 円筒内部の測定

本研究で開発した3次元走査機構を用いた円筒内の測定によって得られた測定点の分布を図5.4~5.6に示す。測定点の分布から得られる円筒の高さは95~100cm、直径は80~90cm程度である。次に $z=0$ における軌道間隔に着目するため、 $z=0$ 付近の領域を拡大した測定点分布を図5.7に示す。なお図中の z 座標は0ではないが、これは機構の高さが含まれた数値となっているためである。図5.7より、軌道間隔はおおむね6~7cmとなっていることが確認できる。

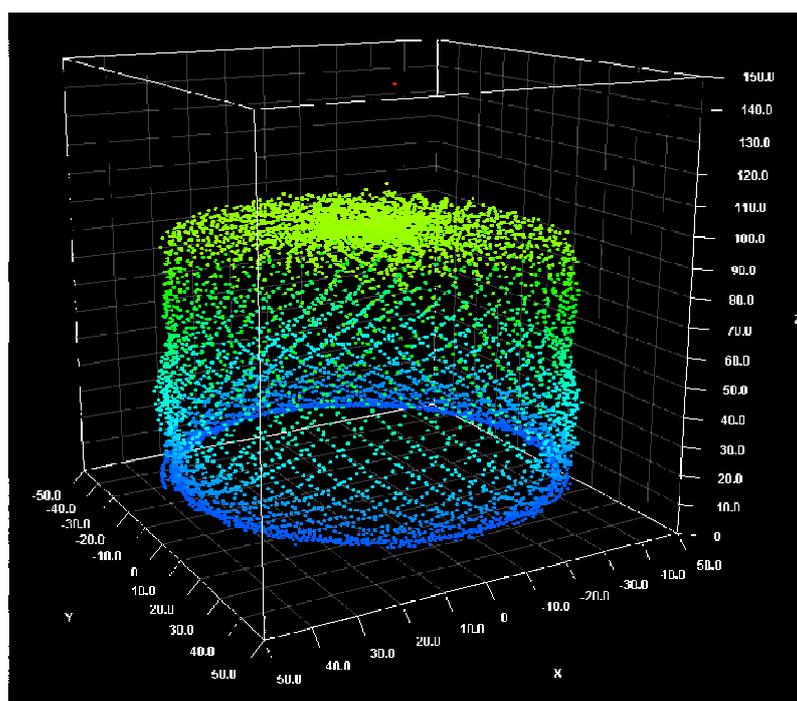


図 5.4: メッシュ状走査軌道によって得られた円筒内の測定点の分布 (概観)

5.5 階段形状の測定

本研究で開発した3次元走査機構によって得られた測定点の分布を図5.8に示す。また図5.8から階段付近のみを切り出し側面から観測した分布を図5.9に示す。 z が90付近より小さい領域では測定点の分布が疎らとなっているものの、それ以下の領域においてはいくつかのまとまった分布が確認できる。 x が215, 240, 270, 295, 320付近の5つの領域において、測定点の分布が集中している。各領域において測定点は z 方向に幅を持った分布となっており、分布範囲は表5.5に示すとおりである。

先行開発された3次元走査機構によって得られた測定点の分布を図5.10に示す。図5.10から階段付近のみを切り出し側面から観測した分布を図5.11に示す。図5.9と同様に x 方向について一定間隔ごとに測定点の分布が集中している。しかし x が250, 270付近では z 方向に幅を持った分布となっているものの、それ以外の領域では z 方向にほぼ一定な分布である。

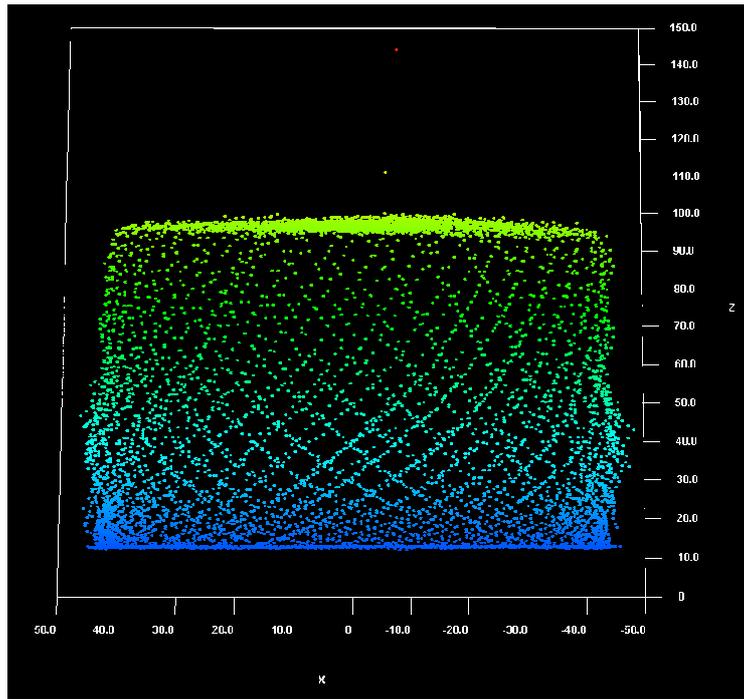


図 5.5: メッシュ状走査軌道によって得られた円筒内の測定点の分布 (側面)

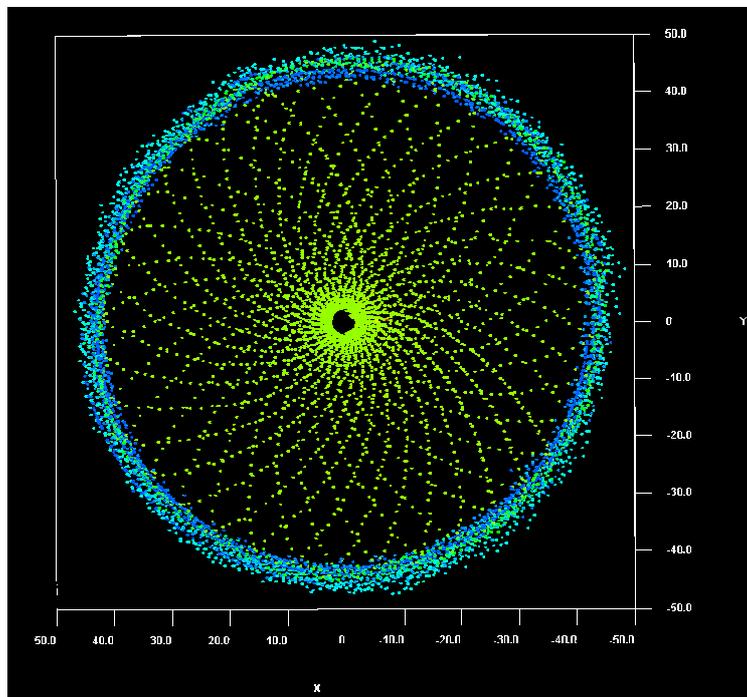


図 5.6: メッシュ状走査軌道によって得られた円筒内の測定点の分布 (底面)

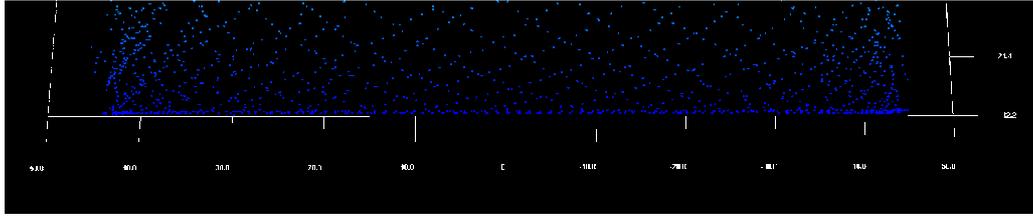


図 5.7: $z = 0$ 付近の測定点の分布

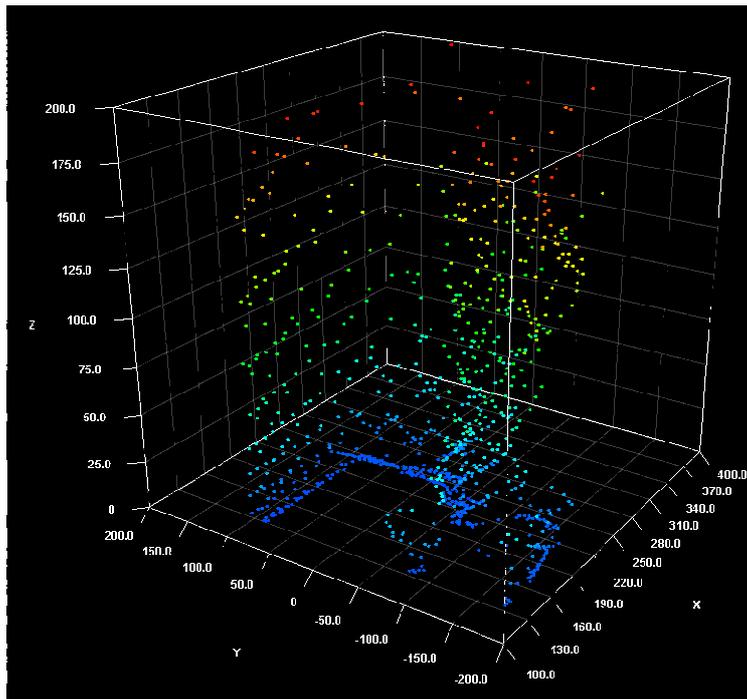


図 5.8: メッシュ状走査軌道によって得られた階段の測定点分布 (概観)

表 5.5: 各領域における測定点の z 方向の分布領域

X方向の分布 [cm]	Z方向の分布範囲 [cm]
215	15~18
240	15~35
270	38~51
295	58~75
320	77~90

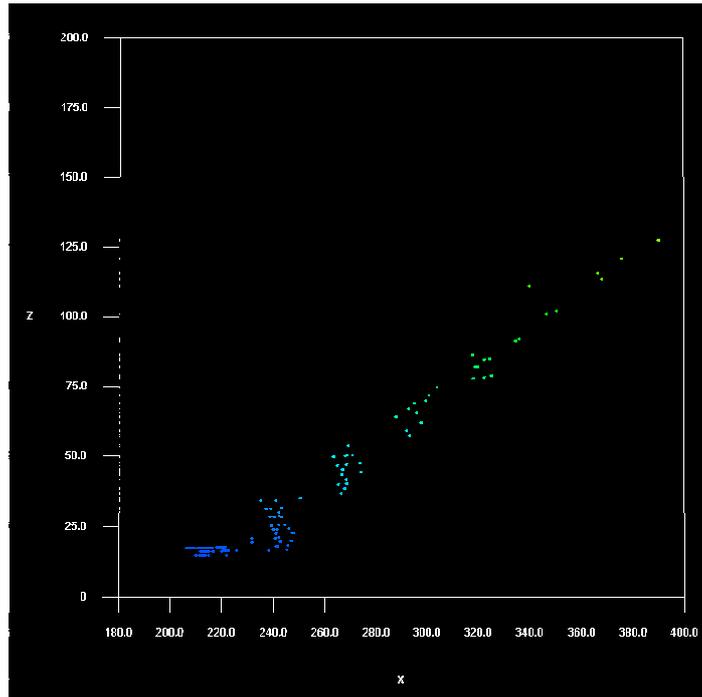


図 5.9: メッシュ状走査軌道によって得られた階段付近の測定点分布

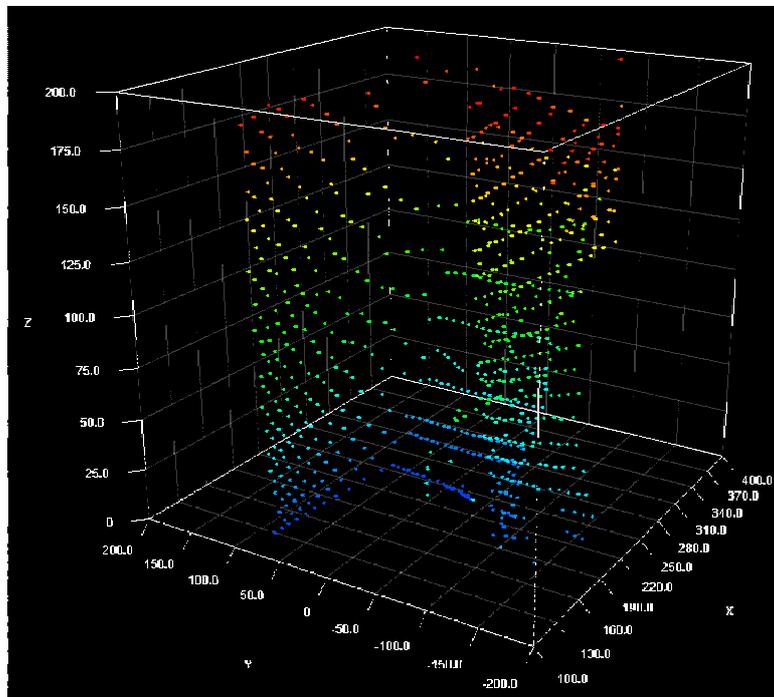


図 5.10: 螺旋状走査軌道によって得られた階段の測定点分布 (概観)

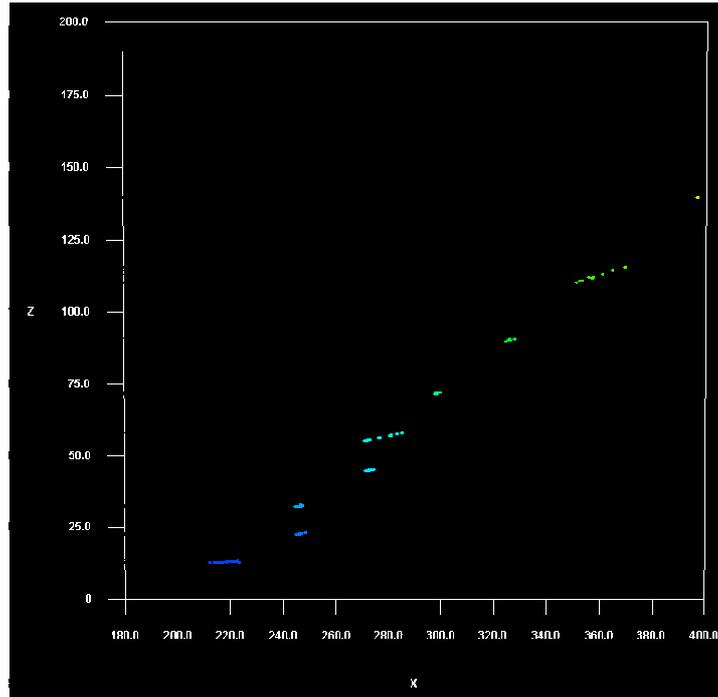


図 5.11: 螺旋状走査軌道によって得られた階段付近の測定点分布

5.6 外部環境測定実験に関する考察

はじめに、3次元走査機構による単位走査軌道の実現性に着目する。3次元走査機構のパン方向回転角度が θ の際に、ロータリーエンコーダ1より得られたチルト方向の角度を $f(\theta)$ 、式(2.2)より計算によって得られたチルト方向の角度を $f_0(\theta)$ とし、式(5.1)によって理論値と実測値の差異 $\epsilon_t(\theta)$ を割合として算出する。

$$\epsilon_t(\theta) = \frac{f(\theta) - f_0(\theta)}{\theta_t} \times 100 = \frac{f(\theta) - f_0(\theta)}{90} \times 100 \quad (5.1)$$

$0 \leq \theta < 350$ の範囲における、 θ と $\epsilon_t(\theta)$ の関係を図5.12に示す。 $0 \leq \theta < 175$ 、すなわちアームの角度が水平から垂直へと変化する範囲に着目すると、ほぼ全領域で実測値が理論値よりも小さな値となっており、特に θ がおおよそ25~80の範囲では5%を超える比較的大きな差異が確認できる。その一方で $175 \leq \theta < 350$ 、すなわちアームが垂直から水平へと変化する範囲に着目すると、ほぼ全領域で実測値が理論値よりも大きな値となっている。 θ が200~300付近の範囲では差異が5%を超え、特に $\theta = 250$ 付近では15%と非常に大きくなっている。以上の結果より、本研究で開発した3次元走査機構は2章で定義した単位走査軌道を概ね実現できているが、特定領域においては理論値との差異が大きくなっていることが確認できる。理論値と実測値に差異が生じる主たる要因としては、機構の製作精度、特にカムに掘られた溝の形状が挙げられる。式(2.2)で定義されるパン方向の角度変化を実現するためにはカムに真円形の溝を掘る必要があるが、実際に製作されたカムの溝は真円形ではない。またカムフォロアがカム溝に沿って円滑に移動するためには、溝とカムフォロアの間に微量の隙間が存在する必要があるため、仮に溝が真円形であったとしても一定の差異が発生してしまう。これらの要因に加えて、スライド板に固定された

ラックとギヤEの間のバックラッシュなどの要因が重なることで差異が生じていると推察される。本研究で開発する3次元走査機構では実測値に基づいた演算によって測定点を得ているため、実測値と理論値の間に差異が生じることが測定精度に与える影響はない。

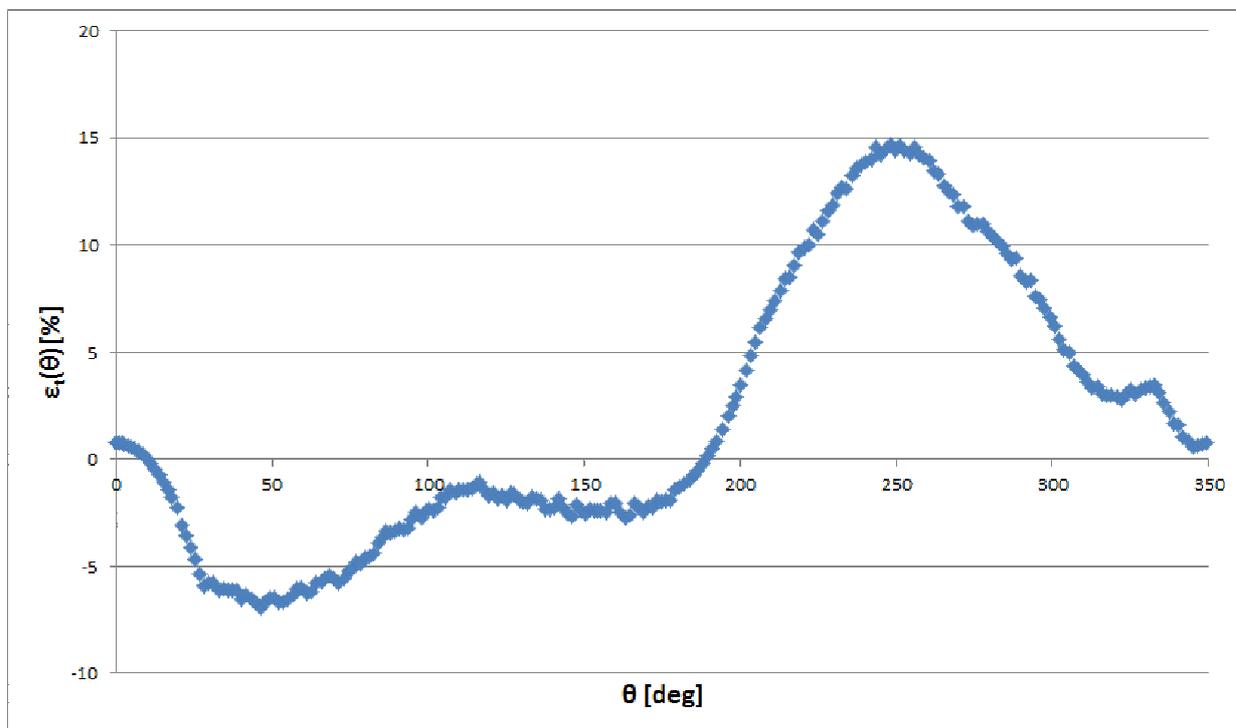


図 5.12: チルト方向角度の理論値と実測値の差異率

続いてパン方向の変化量に対するチルト方向の変化量に着目する。 i 番目のパン方向角度を $\theta_{p,i}$ 、チルト方向角度を $\theta_{t,i}$ とし、パン方向の変化量に対するチルト方向の変化量の割合 α を式 5.4 として定義する。

$$\Delta p = \theta_{p,i} - \theta_{p,i-1} \quad (5.2)$$

$$\Delta t = \theta_{t,i} - \theta_{t,i-1} \quad (5.3)$$

$$\alpha = \frac{\Delta t}{\Delta p} \quad (5.4)$$

それぞれの走査軌道における α の変化を図 5.13 および 5.14 に示す。螺旋状走査軌道においては α が約 0.007 とほぼ一定になっている。それに対してメッシュ状走査軌道では i が 50~80 付近と 175~215 付近の領域において α の絶対値が 1 に近づいている。この結果より、メッシュ状走査軌道では螺旋状走査軌道と比較してパン方向の変化量に対するチルト方向の変化量が向上し、一部の領域においては変化量がほぼ同程度となっていることが確認できる。

次に円筒内部の測定実験の結果に着目する。円筒内部の測定実験の結果では測定点分布が円筒形状よりも数 cm 程度大きくなっているが、予備実験においてレーザ測距センサによって得られる値が 3.5~10cm 程度大きくなったことを考慮すると、円筒形状の概形を認

識しうる測定点分布を得ているといえる．この結果より，本研究で開発した3次元走査機構が外部環境の測定に応用可能であることを確認することができる．また機構からの距離が約40cmであることを考慮すると， $z=0$ における軌道間隔は20%の範囲内に収まっており，機構は仕様を満たしているといえる．

3次元走査機構の精度について，円筒内部の測定実験結果をもとに検証を行う．3次元走査機構の高さを h_m cm，円筒の直径を r_c cm，高さを h_c cmとすると，パン方向の実測角度が θ_{rp} ，チルト方向の実測角度が θ_{rt} の場合の円筒内部の測定点座標の理論値 x_t ， y_t および z_t は式(5.5)~(5.7)によって得られる．以下，実測された測定点を実測測定点，式(5.5)~(5.7)によって得られる理論上の測定点を理論測定点として扱う．

$$x_t = \begin{cases} \frac{r_c}{2} \cos \theta_{rp} & (z \leq 94) \\ \frac{h_c}{\tan \theta_{rt}} \cos \theta_{rp} & (\textit{otherwise}) \end{cases} \quad (5.5)$$

$$y_t = \begin{cases} \frac{r_c}{2} \sin \theta_{rp} & (z \leq 94) \\ \frac{h_c}{\tan \theta_{rt}} \sin \theta_{rp} & (\textit{otherwise}) \end{cases} \quad (5.6)$$

$$z_t = \begin{cases} \frac{r_c}{2} \tan \theta_{rt} + h_m & (z \leq 94) \\ h_c & (\textit{otherwise}) \end{cases} \quad (5.7)$$

円筒内部の実測測定点の座標を x_r ， y_r ， z_r とし，実測測定点と理論測定点との差異 $\epsilon_c(\theta_{rp}, \theta_{rt})$ を式(5.8)として定義する．式(5.8)によって得られる値は，装置から理論測定点までの距離に対する，実測測定点と理論測定点の距離の割合となる．

$$\epsilon_c(\theta_{rp}, \theta_{rt}) = \frac{\sqrt{(x_r - x_t)^2 + (y_r - y_t)^2 + (z_r - z_t)^2}}{\sqrt{x_t^2 + y_t^2 + z_t^2}} \times 100 \quad (5.8)$$

$0 \leq \theta_{rp} < 350$ の範囲における， θ_{rp} と $\epsilon_c(\theta_{rp}, \theta_{rt})$ の関係を図5.15に示す．予備実験の結果より，レーザ測距センサによって測定される値は実際の距離よりも大きくなることを確認した．レーザ測距センサによって得られる値と実際の距離との差分を Δr と仮定し，図5.15には $\Delta r = 0$ と $\Delta r = 8$ の場合の結果を示す． θ_{rp} が150~280付近の領域では， Δr の値に関わらず差異が5%程度となっており，比較的良好な測定結果となっていることが確認できる．その一方でそれ以外の領域については，すべての測定点において $\Delta r = 8$ の差異が $\Delta r = 0$ の差異を下回っている． $\Delta r = 0$ の場合の差異が20~35%程度であるのに対して， $\Delta r = 8$ の場合はほぼすべての測定点において15%以下となっており，この結果は実測測定点と理論測定点の差異にレーザ測距センサの特性が大きく影響していることを示唆するものである．以上の結果より，本研究で開発した3次元走査機構によって，理論測定点に対する差異を15%以下に抑えた実測測定点を得ることができることが確認できる．また差異はレーザ測距センサの特性に大きく依存するため，レーザ測距センサによる測定精度を向上させることで，差異を抑制できると推察される．

階段形状の測定実験に着目すると，本研究で開発した3次元走査機構によって得られた測定点分布では， z 方向に幅を持ったいくつかの測定点群が確認できる．表5.5に示す測

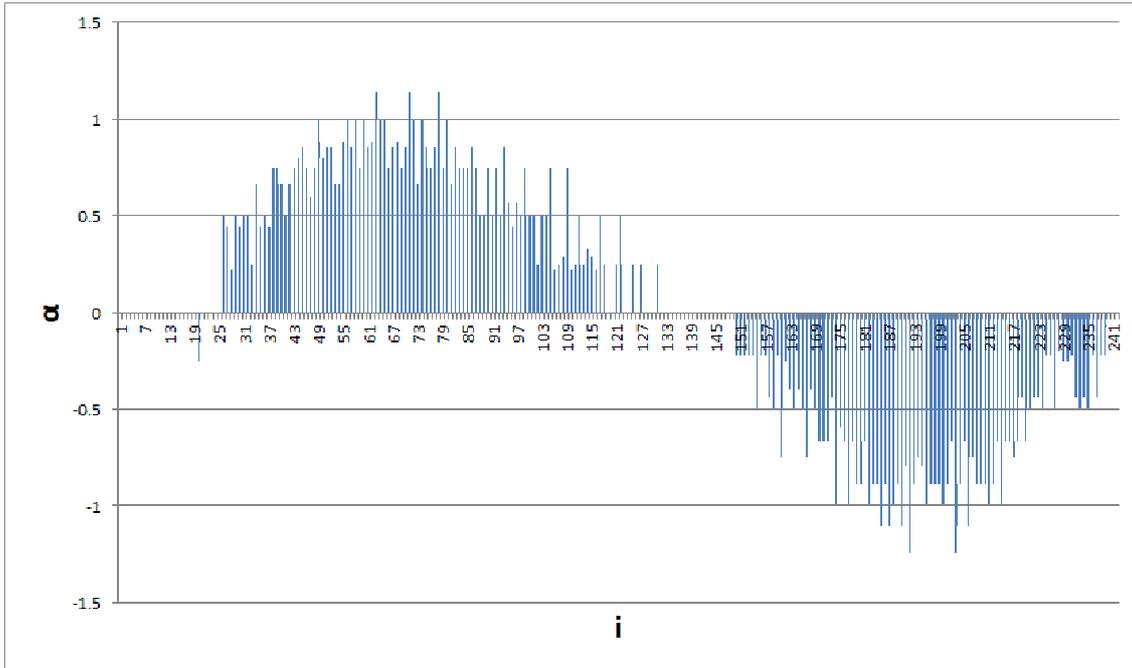


図 5.13: メッシュ状走査軌道における α の変化

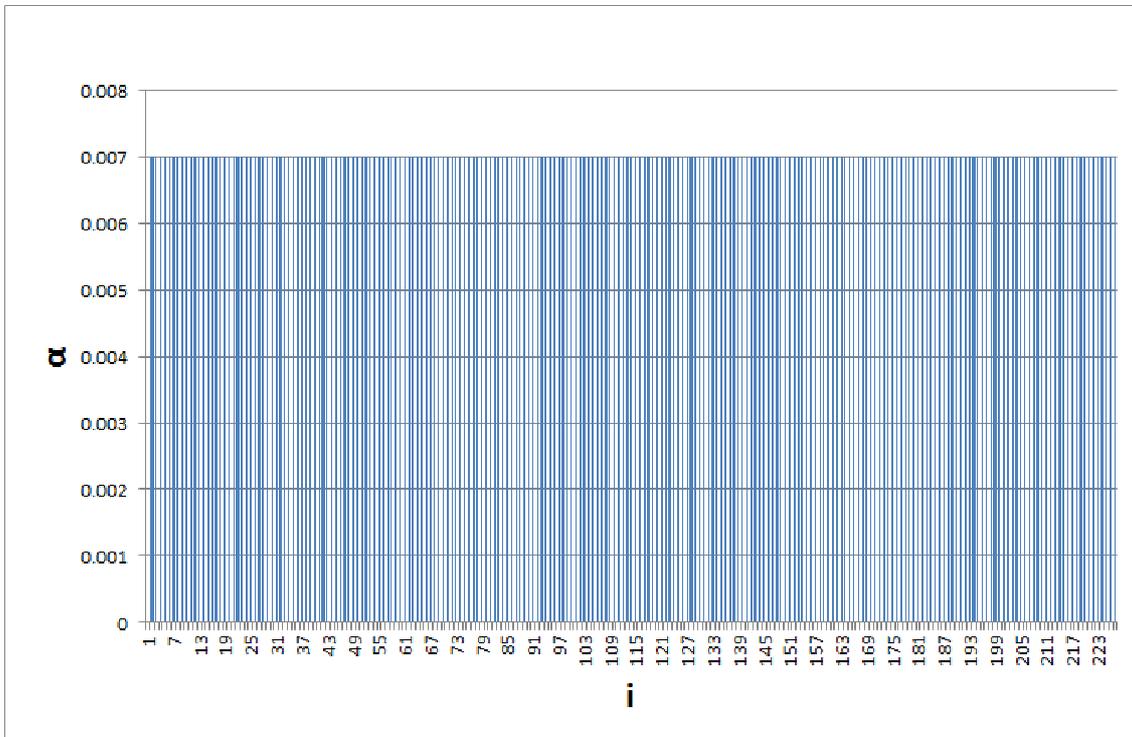


図 5.14: 螺旋状走査軌道における α の変化

定点のz方向の分布領域と、階段の1段あたりの高さが18cmであることを考慮すると、測定点の分布が階段の面と一致していることが確認できる。これは本研究で開発した3次元走査機構によって、階段形状の特徴である面の存在を認識しうる測定点分布が得られていることを示している。すなわち、外部環境に対する情報を全く持たない場合においても、得られた測定点分布から階段の存在を推測できると考えられる。

その一方で、先行開発された3次元走査機構によって得られた測定点分布では、xが240、270付近のみでz方向に幅を持った測定点群が確認できる。そのため外部環境に対する情報を全く持たない場合において、得られた測定点分布から階段と推測できる領域は、本研究で開発する機構と比較して限定的となってしまう。これは機構からの距離が離れることによって軌道間隔が拡大し、階段1段あたりを走査する軌道の本数が減少してしまっていることに起因する。

以上の結果より、メッシュ状走査軌道の測定点分布は螺旋状走査軌道と比較して垂直方向に分散しており、垂直方向の測定において優位性を持つことが確認できる。

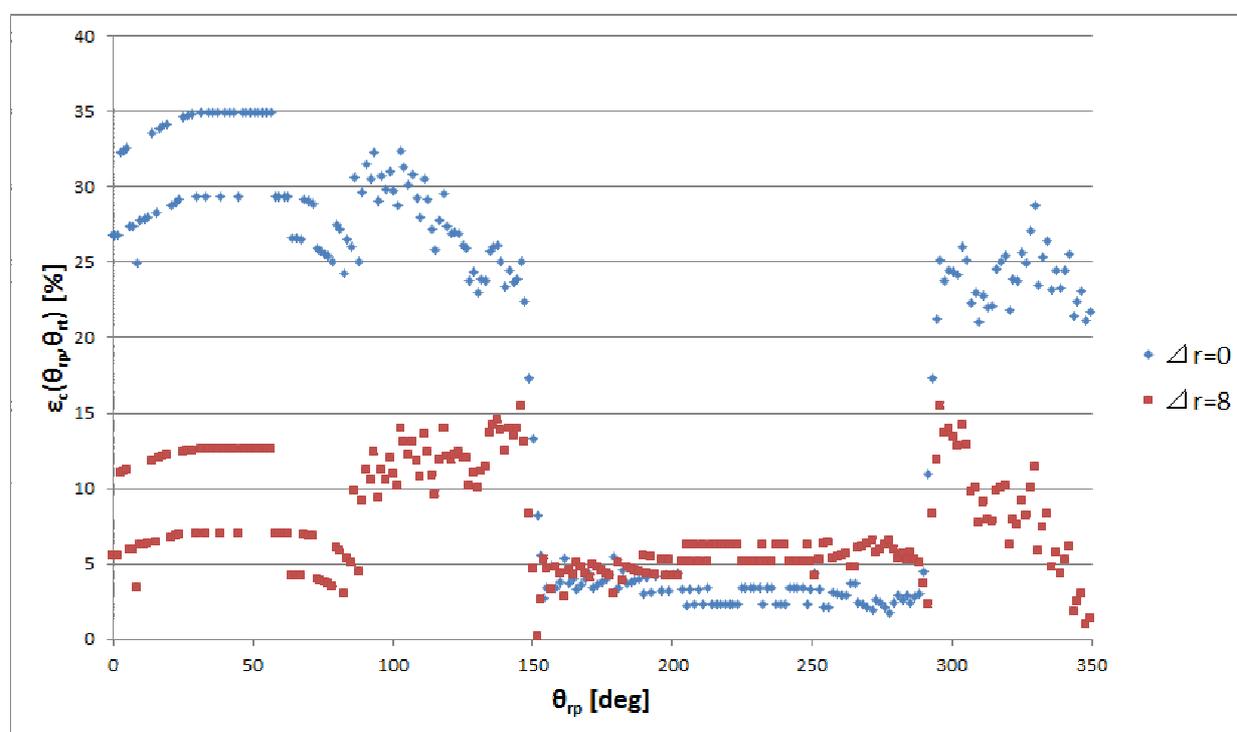


図 5.15: 測定点座標の理論値と実測値の差異率

第6章 まとめ

6.1 結論

本研究では、単一モータによって駆動し、3次元空間を走査する3次元走査機構の開発および検証を行った。本研究で先行開発された3次元走査機構で採用されている螺旋状走査軌道の問題点である、遠方測定時における測定点分布の集中に着目し、この問題を解決することを目的として新たな走査軌道であるメッシュ状走査軌道を提案した。はじめに単位走査軌道を定義し、条件を満たした複数の単位走査軌道を重ね合わせることでメッシュ状走査軌道が構成されることを示した。

続いてメッシュ状走査軌道と螺旋状走査軌道を対象として、局所空間内における測定点数および測定点の分布に関するシミュレーションを行った。シミュレーションの結果より、メッシュ状走査軌道では局所空間内の測定点数は少なくなる傾向があるものの、測定点の分布は螺旋状走査軌道と比較して分散していることを確認することができた。

次にメッシュ状走査軌道によって空間を走査する3次元走査機構の原理および構造を示し、構造的条件および仕様を満たす様に機構のパラメータを決定した。

最後に設計した3次元走査機構を用いて2種類の外部環境測定実験を実施した。実験結果より、開発した3次元走査機構によって得られる単位走査軌道は、定義式より得られる理論値と最大で15%程度の差異が存在するものの、定義した軌道を概ね実現できていることを確認した。パン方向の変化量に対するチルト方向の変化量に着目すると、メッシュ状走査軌道では螺旋状走査軌道と比較して変化量が向上しており、一部の領域においてはパン方向の変化量とチルト方向の変化量が同等程度となることが確認できた。円筒内部に機構を設置して内部形状を測定する実験より、本研究で開発する3次元走査機構が外部環境測定に応用可能である点、設計した機構が仕様を満たしている点、理論測定点との差異を15%以下に抑えた実測測定点を得ることができる点を確認した。一定距離離れた地点から階段の形状を測定する実験より、螺旋状走査軌道では捉えることができない階段のいくつかの面をメッシュ状走査軌道によって捉えることができるという結果が得られ、垂直方向の測定においてメッシュ状走査軌道が優位性を持つことを確認することができた。

6.2 今後の課題

今後の課題を以下に示す。

回転数に着目したモータ制御の実装

3次元走査機構に搭載されたモータの制御は、ドライバに与える信号の電圧を変化させることで行われている。しかし実際にはモータにかかる負荷や電源電圧など

によってモータの回転数が変動するため、印加する信号の電圧が同じでもモータの回転数が同じとは限らない。フィードバック制御などを導入することによってモータの定速回転を実現し、パン方向に対する測定点分布の均一化を図る。

測定点分布の改善を目的とした、アームのチルト方向の運動の再考

本研究で提案するメッシュ状走査軌道では、アームのチルト方向の運動が式 (2.2) として定義される。そのため余弦項の最大値および最小値付近の領域では θ に対する $f(\theta)$ の変化量が小さくなり、測定点が密集していると考えられる。アームのチルト方向の運動を再考し、 θ の変化に対する $f(\theta)$ の変化量の均一化を図ることで、測定点の分布を改善する。

さらなる外部環境測定実験の実施

本研究で実施した2種類の外部環境測定実験では、螺旋状走査軌道の軌道間隔が測定に与える影響を確認することはできたものの、メッシュ状走査軌道については軌道間隔が測定に及ぼす影響を観測することができなかった。測定対象を変えて更なる外部環境測定実験を実施することによって、メッシュ状走査軌道の軌道間隔が測定に与える影響を検証する必要がある。

形状認識アルゴリズムの導入および認識率に基づいた走査軌道の定量的評価

本研究では測定点の分布に着目した走査軌道の検証を行っているが、実際のシステムでは得られた測定点をもとに外部環境の認識を行う必要がある。測定点から形状を推定するアルゴリズムを導入し、推定された形状と実際の形状を比較した認識率などの指標を比較することによって、2つの軌道の比較を定量的に行う。

謝辞

本研究を進めるにあたり，ご指導いただいた北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 丁洛榮教授に深く御礼申し上げます。また研究の助言や支援，お力添えをいただいた丁研究室 Jeong Sungmoon 助教，丁研究室 Ryu Hyejeong 特任助教，丁研究室 博士後期課程 野口尚人氏，ナノマテリアルテクノロジーセンター工作室の皆様にも心より感謝申し上げます。そして様々な形で支援いただいた丁研究室の皆様にも御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Jim Pugh, Xavier Raemy, Cédric Favre, Riccardo Falconi, and Alcherio Martinoli. A Fast Onboard Relative Positioning Module for Multirobot Systems. *IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*, Vol. 14, No. 2, pp. 151 – 162, 2009.
- [2] Kazunori Ohno, Toyokazu Kawahara, and Satoshi Tadokoro. Development of 3D Laser Scanner for Measuring Uniform and Dense 3D Shapes of Static Objects in Dynamic Environment. In *2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 2161 – 2167, 2008.
- [3] Hartmut Surmann, Kai Lingemann, Andreas Nüchter, and Joachim Hertzberg. A 3D laser range finder for autonomous mobile robots. In *32nd ISR(International Symposium on Robotics)*, pp. 153 – 158, 2001.
- [4] Zentarō Nemoto, Hiroshi Takemura, and Hiroshi Mizoguchi. Development of Small-sized Omni-directional Laser Range Scanner and Its Application to 3D Background Difference. In *33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, pp. 2284 – 2289, 2007.
- [5] Jesús Morales, Jorge L. Martínez, Anthony Mandow, Alejandro Peque o-Boyer, and Alfonso García-Cerezo. Design and Development of a Fast and Precise Low-Cost 3D Laser Rangefinder. In *2011 IEEE International Conference on Mechatronics*, pp. 621 – 626, 2011.
- [6] Tomoaki Yoshida, Kiyoshi Irie, Eiji Koyanagi, and Masahiro Tomono. 3D Laser Scanner with Gazing Ability. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3098 – 3103, 2011.
- [7] Katsumi Kimoto, Norihiro Asada, Toshihiro Mori, Yoshitaka Hara, Akihisa Ohya, and Shin'ichi Yuta. Development of Small Size 3D LIDAR. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4620 – 4626, 2014.
- [8] 松本光広. 回転する曲面鏡を用いた二次元レーザ距離センサの三次元化. 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 79, No. 802, pp. 242 – 256, 2013.
- [9] 今村彰隆, 三輪昌史, 日野順市. マルチコプタに搭載された測域センサの三次元化. In *2014 JSME Conference on Robotics and Mechatronics*, 2014.

- [10] 藤原浩平, 千野遼平, 太田哲平, 石川貴一朗, 天野嘉春, 橋詰匠. 屋内外で利用可能な可搬型三次元計測装置の開発. In *2013 JSME Conference on Robotics and Mechatronics*, 2013.
- [11] 学校法人京都産業大学. 撮像装置のパンチルト機構. 特開 2006-90377. 2006-4-6.
- [12] Geunho Lee, Naoto Noguchi, Nobuya Kawasaki, and Nak Young Chong. An Integrated 2D and 3D Location Measurement System Using Spiral Motion Positioner. In *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4422 – 4427, 2012.
- [13] 中西健. 螺旋状走査用 3 次元センサポジショナの開発. Master's thesis, 北陸先端科学技術大学院大学, 2014.
- [14] 野口尚人. 螺旋軌道を用いた二次元および三次元測位装置の開発. Master's thesis, 北陸先端科学技術大学院大学, 2012.