

小型の広視野三次元測域センサの開発と
屋内形状の特徴を用いたセンサの
移動軌跡の推定

松本 光広

システム情報工学研究科

筑波大学

2011 年 3 月

概要

まえがき

論文目次における第1章では、まえがきとして本研究の背景と目的について述べる。

屋内や屋外環境における生活空間の構成は、そこで生活を行う人の動きと密接に結びついている。生活空間の設計者が、このような環境において空間の三次元形状情報を取得して、生活する人の動きと生活空間を構成する幾何学的形状を把握することで、生活空間の改築や新たな設計の検討材料として役立てることができる。さらに、学校やオフィスビルなど広い空間を持つ屋内施設においては、生活空間の設計者が広い範囲の三次元形状地図を容易に取得して、その地図を確認することができるようにしたい。そのために人がセンサシステムを持ち運べて、実時間で地図を生成できて、かつその空間の形状の違いが分かる精度をもつセンサシステムが求められている。

本研究の目的は、生活空間の設計者が人の動きや生活空間の幾何学的形状を把握するために三次元形状情報を容易に取得できる、回転式揺動機構と SCIP-3D コマンドシステムを用いた三次元測域センサモジュールを実現することである。さらに、生活空間の設計者が、学校やオフィスビルなど屋内施設の広い範囲において三次元環境地図を生成するために、屋内形状の特徴を用いた可搬型の三次元移動量推定・環境地図生成システムを開発することを研究の目的とした。

回転式揺動機構と SCIP-3D コマンドシステムを用いた三次元測域センサモジュール

論文目次における第2章では、「回転式揺動機構と SCIP-3D コマンドシステムを用いた三次元測域センサモジュール」について、研究の背景、目的、アプローチ、結果および成果を述べる。

第2章の研究の背景と目的

屋内や屋外環境における生活空間の構成は、そこで生活を行う人の動きと密接に結びついている。生活空間の設計者が、このような環境において空間の三次元形状情報を取得して、生活する人の動きと生活空間を構成する幾何学的形状を把握することで、生活空間の改築や新

たな設計の検討材料として役立てることができる。例えば、生活空間の設計者が、取得した三次元形状情報を確認することで、学校やオフィスビルのような屋内環境において、災害発生時に人の移動を妨げるような建物内部の構成を評価できる。生活空間の設計者が、空間構成の危険箇所における改築方法の検討材料としても役立てることができる。屋外環境においても、生活空間の設計者が三次元形状情報を用いることで、人が移動する通路における移動可能範囲を評価したり、新たな空間の建物を設計することに役立つ。

本研究の目的は、生活空間の設計者が人の動きや生活空間の幾何学的形状を把握するために三次元形状情報を容易に取得できる、回転式揺動機構と SCIP-3D コマンドシステムを用いた三次元測域センサモジュールを実現することである。実現するセンサモジュールは、三次元測域センサを一つの機能要素としてまとめるモジュール化によって、センサの開発者だけではなく、センサの詳細な構成を知らない生活空間の設計者などが容易に三次元形状情報を取得できるものである。

第2章の研究のアプローチ

初めに、実現する三次元測域センサモジュールの目標とする仕様と性能に関して、センサモジュールの走査方式および測距性能を示す。

三次元測域センサを一つの機能要素としてまとめるモジュール化のために、油田らが策定した SCIP-3D に準拠した、その最小セットとも言うべきコマンドシステムとして、SCIP-3D mini を定義する。定義した SCIP-3D mini コマンドシステムのユーザプログラムインターフェイス、通信方式、コマンドおよびレスポンスの基本構造および各コマンドの詳細を設計する。

目標とする仕様と性能を満たす三次元測域センサモジュールを、森らが考案した二次元測域センサを回転式揺動機構を用いて三次元的に揺動させる走査方式を用いて構成し、実現する。そのために実現するセンサモジュールのハードウェアは、二次元測域センサ部、回転式揺動機構およびコントローラにより構成する。コントローラは回転式揺動機構を制御する揺動コントローラおよびセンサモジュール全体を統括するメインコントローラから成る。

構成するセンサモジュールのハードウェアに対して、そのハードウェアの制御、取得したレーザ反射点位置の計算および SCIP-3D mini コマンドインターフェイスのためのソフトウェアを実装する。ソフトウェアの構成を検討して、揺動機構の制御系およびメインコントローラ上のプロセスを設計して、実際にソフトウェアを実装する。

実現した三次元測域センサモジュールを用いて、その測距領域を確認する。確認のための実験を行い、その実験結果を考察して、センサモジュールの性能を評価する。

実現した三次元測域センサモジュールの目標とする測距精度を確認する。確認のための実験を行い、その実験結果を考察して、センサモジュールの性能を評価する。

実現した実際の三次元測域センサモジュールを用いて、屋内の環境でリアルタイムで環境を観察する実験を行う。実験室内の形状の観察、屋外環境の観察および動物体を含む環境の観察を行い、その観察結果を考察して、センサモジュールの性能を評価する。

第2章の研究の結果と成果

生活空間の設計者が人の動きや生活空間の幾何学的形状を把握するために三次元形状情報を容易に取得するために、私は回転式揺動機構と SCIP-3D mini コマンドシステムを用いた三次元測域センサモジュールを実現した。三次元測域センサを一つの機能要素としてまとめるモジュール化によって、センサの開発者だけではなく、センサの詳細な構成を知らない生活空間の設計者などが容易に三次元形状情報を取得できる。

三次元測域センサモジュールは、森らが考案した二次元測域センサを回転式揺動機構を用いて走査する方式と、油田らが策定した SCIP-3D コマンドインターフェイスに準拠して、私が設計した SCIP-3D mini コマンドシステムをインターフェイスとした。センサモジュールのハードウェアは、二次元測域センサ、回転式揺動機構、揺動機構を制御する揺動コントローラおよびメインコントローラにより構成した。ソフトウェアとして、揺動機構の制御系を揺動コントローラに、二次元測域センサと回転式揺動機構を用いた走査から三次元反射点位置を計算するプロセスと SCIP-3D mini のコマンドを処理するプロセスをメインコントローラに実装した実現したセンサモジュールの仕様は以下の通りである。

- センサモジュールの視野は、水平方向に 270 °、垂直方向は可変可能な 30-120 ° と三次元空間において帯状の視野を持つ。
- 対象物においてほぼ均一に分布したレーザ反射点の集合を取得する。
- 最速 0.2 秒で、高速に三次元空間の反射点を取得できる。
- 反射点の分解能として、測距精度は $\pm 5\text{cm}$ である。
- レーザ光線による測距を行うために、環境中の照明条件に左右されにくい。
- センサモジュールの大きさは、比較的小型である。
- SCIP-3D mini コマンドシステムにより、センサモジュールのユーザが容易に三次元反射点の位置を取得できる。

実現した三次元測域センサモジュールを用いて、屋内および屋外環境の計測結果を示した。この結果より目標とするセンサモジュールの仕様において、実際に人が生活する屋内および屋外環境の生活空間の三次元形状、および歩いて移動する人の三次元形状を得られることを確認した。

三次元測域センサモジュールは、そのモジュール化によってセンサの開発者だけではなく、センサの詳細な構成を知らないユーザが容易に三次元形状情報を取得できることが特徴である。既にこのセンサモジュールは、開発者以外の筑波大学知能ロボット研究室内のユーザによって、人の動きの検出や移動ロボットを用いた屋内の三次元地図生成など、それぞれの研究のために使われている。

屋内形状の特徴を用いた可搬型の三次元移動量推定・環境地図生成システム

論文目次における第3章では、「屋内形状の特徴を用いた可搬型の三次元移動量推定・環境地図生成システム」について、研究の背景、目的、アプローチ、結果および成果を述べる。

第3章の研究の背景と目的

学校やオフィスビルなど屋内施設の広い範囲において、多くの人たちが快適に施設を利用するために、生活空間の設計者はその広い生活空間の構成を把握する必要がある。生活空間の設計者が、施設の空間内において生活する人たちにとって生活しやすい空間構成を把握することで、空間構成の改善や新たな設計を行うことができる。そのために、学校やオフィスビルにおける屋内内部の広い範囲において、生活空間の設計者が三次元形状地図を容易に取得して、その地図を確認することができるようにしたい。人がセンサシステムを持ち運んで、実時間で地図を生成できて、かつその空間の形状の違いが分かる精度をもつセンサシステムが求められている。

生活空間の設計者が、学校やオフィスビルなど屋内施設の広い範囲において三次元環境地図を生成するために、屋内形状の特徴を用いた可搬型の三次元移動量推定・環境地図生成システムを開発する。開発するシステムでは、屋内環境において三次元環境地図を生成するために、屋内環境の三次元空間において、センサシステムが三次元形状情報としてレーザ反射点のポイントクラウドを取得する。取得したポイントクラウドから、屋内環境の直角平行な面の特徴を利用して、移動するシステムの回転量および三次元移動軌跡を推定する。さらに、推定した回転量および三次元移動軌跡を用いて、ポイントクラウド形式により三次元形状地図を生成する。これらの方法を開発し、その試作システムを実現することを本研究の目的とした。

第3章の研究のアプローチ

開発するセンサシステムが対象とする環境を分析して、システムの実現に必要な機能を考え、システムの基本構成と設計を行う。

システムのハードウェアを、三次元空間のポイントクラウドを取得する三次元測域センサ部、システムの姿勢情報を取得する姿勢センサ部および情報処理を行うコントローラ部により構成する。三次元測域センサ部は、二次元測域センサ、回転式揺動機構および回転式揺動機構を制御する揺動コントローラにより構成して、小型で高速かつ広範囲な走査を可能とする本センサを用いて屋内環境の三次元的なレーザ反射点群を取得する。姿勢センサ部からシステム本体の姿勢情報であるロールおよびピッチ角を取得する。各構成要素を用いて、試作システムを実際に構成する。

開発するセンサシステムでは、ロールおよびピッチ角は姿勢センサから取得した値を用い、ヨー角は三次元空間とセンサのなす角として三次元空間のレーザ反射点群を用いて計算により求める。

屋内環境の三次元移動量の推定のために、システムのセンサ情報から屋内環境の直角平行な柱や壁、天井を面として検出し、移動によって変化するその各々の面とシステムのセンサ部との間の距離からセンサ部の移動量を計算する。屋内環境を構成するホール、階段および廊下環境は、それぞれ直角平行な壁や天井の面で構成されるが、それぞれの環境において構成される面の特徴は異なる。そのために、ホール、階段および廊下環境を通した移動量の推定では、これらの環境の異なる特徴を考慮して各環境において各々システムのセンサ部の移動量を求める方法を定め、さらにこれらの環境の間を移動するときに、その移動を判定する条件を定めて各計算方法を切り替える。

試作したハードウェアに、上記のアルゴリズムを実装することで、センサシステムを試作する。

試作したセンサシステムを用いて、実際の屋内環境においてシステムを働かせることで、移動量の推定および三次元地図を生成するアルゴリズムの有効性を確認する。オペレータは、センサシステムを持ち運びホール、階段および廊下環境を歩いて移動して、一旦停止してシステムを働かせる。確認のための実験を行い、その実験結果について考察する。

第3章の研究の結果と成果

生活空間の設計者が、学校やオフィスビルにおける屋内内部の広い範囲において三次元形状地図を容易に取得して、その地図を確認できることを目指して、私は屋内形状の特徴を用いた人が持ち運び移動できる三次元移動量推定・環境地図生成システムを開発した。これを実現するために、システムの構成方法を考察して、システムの三次元移動量推定のためのアルゴリズムを考案した。このシステムは、私が実現した回転式揺動機構を用いた三次元測域センサを用いることで、広い範囲の屋内空間における三次元形状情報を取得し、取得した情報によりセンサ自身の移動軌跡を推定し、さらにこの移動軌跡を用いて三次元地図を生成するものである。

三次元移動量推定アルゴリズムを構築するために、まず対象とする屋内環境を分析して、その特徴をまとめた。その結果、屋内環境の直角平行な柱や壁、天井を検出してその面との距離を用いてセンサの移動量を推定することとした。ホール、階段および廊下はそれぞれ直角平行な壁や天井の面で構成されるが、それぞれの環境における構成の特徴が異なる。そのために、ホール、階段および廊下環境を通した移動量の推定では、これらの環境の異なる特徴を考慮して各環境において異なる計算方法の条件を用いて、さらにこれらの環境の間を移動するときに、その移動を判定する条件を用いて各計算方法を切り替えた。

この方式とアルゴリズムの有効性を確認するために、実際にシステムを試作し、ソフトウェアを開発してシステムに実装した。試作したシステムを用いて、筑波大学構内の屋内環境で実験を行い、移動軌跡の推定とそれに基づく地図作成を行った。その結果、実際の空間におけ

る三次元形状地図との比較から，正確な三次元移動軌跡の推定および三次元地図が得られることが分かった．よってシステムの構成方法とアルゴリズムの有効性を確認した．

また，このアルゴリズムが適応できる場所は，屋内空間の柱や壁，天井の直角平行な面の三次元形状情報が取得できる場合に限られるが，多くの屋内環境は直角平行で床や天井の面も十分平らなので，このアルゴリズムが適用できると考えられる．そのために，本手法の適応可能範囲は広いと考えている．

あとがき

論文目次における第4章では，あとがきとして本研究の成果と今後の展望について述べる．

生活空間の設計者が人の動きや生活空間の幾何学的形状を把握するために三次元形状情報を容易に取得するために，私は回転式揺動機構と SCIP-3D mini コマンドシステムを用いた三次元測域センサモジュールを実現した．三次元測域センサモジュールは，その開発者以外の多くの人々が容易に様々な目的に利用するために開発した．その一例として，開発した三次元測域センサモジュールは，生活空間の設計者が屋内および屋外環境中に設置することで，空間の三次元形状情報を取得することに役立てたい．設計者が取得した情報を用いることで，生活空間の構成を把握して空間構成の改築や新たな設計の判断材料として役立てることが期待される．

生活空間の設計者が，学校やオフィスビルにおける屋内内部の広い範囲において三次元形状地図を容易に取得して，その地図を確認できることを目指して，私は屋内形状の特徴を用いた人が持ち運び移動できる三次元移動量推定・環境地図生成システムを開発した．可搬型の三次元移動量推定・環境地図生成システムは，そのシステムの構成方法と移動軌跡を推定する計算方法を考慮して，試作したシステムを用いることでその有効性を確かめた．実際に実用的なシステムに発展させることが今後の方向である．そのシステムを生活空間の設計者が用いることで，学校やオフィスビルなどのさまざまな広範囲な屋内環境において三次元地図を生成して，生成した三次元地図から健全な生活空間の構成方法を検討することに役立ててもらいたい．

目次

第1章	まえがき	1
1.1	本研究の背景	1
1.2	本研究の目的	1
1.3	本論文の構成	2
第2章	回転式揺動機構と SCIP-3D コマンドシステムを用いた三次元測域センサモジュール	3
2.1	第2章の序論	4
2.1.1	研究の背景	5
2.1.2	従来の研究	5
2.1.3	本研究の目的	6
2.2	目標とする三次元測域センサモジュールの仕様と性能	8
2.2.1	走査方式	9
2.2.2	測距性能	9
2.3	SCIP-3D mini コマンドシステムの設計	11
2.3.1	ユーザプログラムインターフェイス	12
2.3.2	通信方式	12
2.3.3	各コマンドの概要	12
2.3.4	コマンドおよびレスポンスの基本構造	13
2.3.5	コマンドの詳細	15
2.4	ハードウェアの構成と実装	21
2.4.1	開発した三次元測域センサモジュールのハードウェアの構成	22
2.4.2	二次元測域センサ部	24
2.4.3	三次元揺動機構	24
	揺動機構の概要	24
	揺動部の動き	27
	揺動部の駆動方法	29
2.4.4	コントローラ	29
	メインコントローラ	31
	揺動コントローラ	33
2.5	ソフトウェアシステム	35
2.5.1	ソフトウェアの構成	36

2.5.2	揺動機構の制御系	39
2.5.3	メインコントローラ上のプロセス	39
	三次元反射点位置の計算法	39
	二次元測域センサデータ取得と三次元反射点位置計算プロセス	40
	コマンド処理プロセス	40
2.6	開発したセンサモジュールの測距領域の確認	41
2.6.1	測距領域確認のための実験	42
2.6.2	結果	45
2.7	開発したセンサモジュールの測距精度の確認	46
2.7.1	測距精度確認のための実験	47
2.7.2	実験結果	54
2.7.3	実現したセンサモジュールの測距精度	54
2.8	開発したセンサモジュールによる環境観察の例	55
2.8.1	実験室内の形状の観察	56
2.8.2	屋外環境の観察	60
2.8.3	動物体を含む環境の観察	64
2.9	第2章の結論	68
第3章	屋内形状の特徴を用いた可搬型の三次元移動量推定・環境地図生成システム	69
3.1	第3章の序論	70
3.1.1	研究の背景	71
3.1.2	従来の研究	71
3.1.3	研究の目的	72
3.2	屋内形状の特徴を用いた可搬型の三次元移動量推定・環境地図生成システムに 必要な機能とシステム構成	73
3.2.1	対象とする環境の分析	74
3.2.2	システムの実現に必要な機能	76
3.2.3	システムの基本構成と設計	76
3.3	ハードウェアの構成	77
3.3.1	試作システムの構成と各部の役割	78
3.3.2	試作システムの動作	81
3.4	移動量の計算と地図生成	83
3.5	姿勢の測定	85
3.5.1	ピッチ角とロール角	86
3.5.2	ヨー角の計算	86
3.6	移動量の推定	88
3.6.1	ホール環境における移動量の計算	89
3.6.2	階段環境における移動量の計算	92
3.6.3	廊下環境における移動量の計算	94

3.6.4	環境の変化の判定と移動量計算アルゴリズムの切り替え	96
3.6.5	移動軌跡の計算と三次元地図の生成	96
3.7	実験による有効性の確認	97
3.8	実験と結果	99
3.8.1	実験の内容	100
3.8.2	実験結果	100
3.8.3	実験結果に対する考察	110
3.9	第3章の結論	111
第4章	あとがき	112
4.1	本研究の成果	112
4.1.1	回転式揺動機構と SCIP-3D mini コマンドシステムを用いた三次元測域 センサモジュール	112
4.1.2	屋内形状の特徴を用いた可搬型の三次元移動量推定・環境地図生成シ ステム	113
4.2	今後の展望	114
	謝辞	115
	参考文献	116
	著者研究業績目録	119

図 目 次

2.1	Image of 3D SOKUIKI sensor module	23
2.2	2D SOKUIKI sensor unit and roundly swinging mechanism	25
2.3	Changing position of 2D SOKUIKI sensor unit by rod rotation	26
2.4	Coordinate system	28
2.5	Structure of controller	30
2.6	Main controller	32
2.7	Swinging controller	34
2.8	Process of controller	37
2.9	Timing diagram of process in case of GLP command	38
2.10	Set of reflecting point (X, Y, Z) of constant distance (1 [m]) in case of 1.0 [sec] scanning rotation	43
2.11	Set of reflecting point (X, Y, Z) of constant distance (1 [m]) in case of 0.2 [sec] scanning rotation	44
2.12	Image of 3L307 room	48
2.13	X - Y - Z plot of reflecting point (X, Y, Z) in 3L307 room	49
2.14	X - Y plot of reflecting point (X, Y, Z) in 3L307 room	50
2.15	X - Z plot of reflecting point (X, Y, Z) in 3L307 room	51
2.16	Y - Z plot of reflecting point (X, Y, Z) in 3L307 room	52
2.17	Part of X - Z plot of reflecting point (X, Y, Z) in 3L307 room	53
2.18	3L402 room for experiment in indoor environment	57
2.19	Result and reflecting points (X, Y, Z) in 3L402 room	58
2.20	Front of 3L building for experiment in outdoor environment	61
2.21	Result and reflecting points (X, Y, Z) for outside of 3L building	62
2.22	Image of 3L307 room	65
2.23	Results of reflecting point (X, Y, Z) by 1.0 [sec] scanning rotation	66
2.24	Results of reflecting point (X, Y, Z) by 0.2 [sec] scanning rotation	67
3.1	Image of indoor environment	75
3.2	Developed transportable system for three dimensional motion distance estimation and mapping	79
3.3	Transportable system for three dimensional motion distance estimation and map- ping and the user	80

3.4	Structure of developed system	82
3.5	Process in calculation of yaw angle of system in indoor environment	87
3.6	Process in calculation of motion distance in hall environment	91
3.7	Process in calculation of motion distance in stairs environment	93
3.8	Processe in calculation of motion distance in gallery environment	95
3.9	Real layout of indoor environment	101
3.10	Aspect of experiment	102
3.11	X - Y - Z plot of measured sensor position and reflecting point	103
3.12	X - Y plot of measured sensor position and reflecting point in 1st floor	104
3.13	X - Y plot of measured sensor position and reflecting point in 2nd floor	105
3.14	X - Y plot of measured sensor position and reflecting point in 3rd floor	106
3.15	X - Y plot of measured sensor position and reflecting point in 4th floor	107
3.16	X - Z plot of measured sensor position and reflecting point	108
3.17	Y - Z plot of measured sensor position and reflecting point	109

表 目 次

2.1	Target performance of 3D SOKUIKI sensor module	10
2.2	Basic type of request	14
2.3	Basic type of response	14
2.4	Request type of SRC command	17
2.5	Substance of control code of SRC command	17
2.6	Response type of SRC command	17
2.7	Substance of status code of SRC command	17
2.8	Request type of SBM command	17
2.9	Response type of SBM command	17
2.10	Substance of status code of SBM command	18
2.11	Request type of QBM command	18
2.12	Response type of QBM command	18
2.13	Request type of SCT command	18
2.14	Response type of SCT command	18
2.15	Request type of GLP command	18
2.16	Response type of GLP command (In case where status code is not 00)	18
2.17	Substance of status code of GLP command	19
2.18	Response type of GLP command (In case where status code is 00)	19
2.19	Request type of GFP command	19
2.20	Response type of GFP command (In case where status code is not 00)	20
2.21	Substance of status code of GFP command	20
2.22	Response type of GFP command (In case where status code is 00)	20
2.23	Comparisons with average distance between reflecting point and actual distance from sensor module to wall in indoor environment	59
2.24	Comparisons with average distance between reflecting point and actual distance from sensor module to wall in outdoor environment	63

第1章 まえがき

1.1 本研究の背景

屋内や屋外環境における生活空間の構成は，そこで生活を行う人の動きと密接に結びついている．生活空間の設計者が，このような環境において空間の三次元形状情報を取得して，生活する人の動きと生活空間を構成する幾何学的形状を把握することで，生活空間の改築や新たな設計の検討材料として役立てることができる．例えば，生活空間の設計者が，取得した三次元形状情報を確認することで，学校やオフィスビルのような屋内環境において，災害発生時に人の移動を妨げるような建物内部の構成を評価できる．生活空間の設計者が，空間構成の危険箇所における改築方法の検討材料としても役立てることができる．屋外環境においても，生活空間の設計者が三次元形状情報を用いることで，人が移動する通路における移動可能範囲を評価したり，新たな空間の建物を設計することに役立つ．

さらに，学校やオフィスビルなど屋内施設の広い範囲において，多くの人たちが快適に施設を利用するために，生活空間の設計者はその広い生活空間の構成を把握する必要がある．生活空間の設計者が，施設の空間内において生活する人たちにとって生活しやすい空間構成を把握することで，空間構成の改善や新たな設計を行うことができる．そのために，学校やオフィスビルにおける屋内内部の広い範囲において，生活空間の設計者が三次元形状地図を容易に取得して，その地図を確認することができるようにしたい．人がセンサシステムを持ち運べて，実時間で地図を生成できて，かつその空間の形状の違いが分かる精度をもつセンサシステムが求められている．

1.2 本研究の目的

本研究の目的は，生活空間の設計者が人の動きや生活空間の幾何学的形状を把握するために三次元形状情報を容易に取得できる，回転式揺動機構と SCIP-3D コマンドシステムを用いた三次元測域センサモジュールを実現することである．実現するセンサモジュールは，三次元測域センサを一つの機能要素としてまとめるモジュール化によって，センサの開発者だけではなく，センサの詳細な構成を知らない生活空間の設計者などが容易に三次元形状情報を取得できるものである．

さらに，生活空間の設計者が，学校やオフィスビルなど屋内施設の広い範囲において三次元環境地図を生成するために，屋内形状の特徴を用いた可搬型の三次元移動量推定・環境地図生成システムを開発する．開発するシステムでは，屋内環境において三次元環境地図を生成す

るために、屋内環境の三次元空間において、センサシステムが三次元形状情報としてレーザ反射点のポイントクラウドを取得する。取得したポイントクラウドから、屋内環境の直角平行な面の特徴を利用して、移動するシステムの回転量および三次元移動軌跡を推定する。さらに、推定した回転量および三次元移動軌跡を用いて、ポイントクラウド形式により三次元形状地図を生成する。これらの方法を開発し、その試作システムを実現することを本研究の目的とした。

1.3 本論文の構成

第1章の「まえがき」では、本研究の背景と目的について述べる。第2章では、「回転式揺動機構と SCIP-3D コマンドシステムを用いた三次元測域センサモジュール」について、研究の背景、目的、アプローチ、結果および成果を述べる。第3章では、「屋内形状の特徴を用いた可搬型の三次元移動量推定・環境地図生成システム」について、研究の背景、目的、アプローチ、結果および成果を述べる。第4章の「あとがき」では、本研究の成果と今後の展望について述べる。

第2章 回転式揺動機構と SCIP-3D コマンドシステムを用いた三次元測域センサモジュール

私は、生活空間の設計者が人の動きや生活空間の幾何学的形状を把握するために三次元形状情報を容易に取得できる、回転式揺動機構と SCIP-3D mini コマンドシステムを用いた三次元測域センサモジュールを開発した。以下、2.1 節で本章の序論、2.2 節で目標とする三次元測域センサモジュールの仕様と性能、2.3 節で SCIP-3D mini コマンドシステムの設計、2.4 節でハードウェアの構成と実装、2.5 節でソフトウェアシステム、2.6 節で開発したセンサモジュールの測距範囲の確認、2.7 節で開発したセンサモジュールの測距精度の確認、2.8 節で開発したセンサモジュールによる環境観察の例および 2.9 節で本章の結論について述べる。

2.1 第2章の序論

回転式揺動機構と SCIP-3D コマンドシステムを用いた三次元測域センサモジュールに関して、2.1 節で研究の背景、2.2 節で関連する従来の研究および 2.3 節で本研究の目的について以下に述べる。

2.1.1 研究の背景

屋内や屋外環境における生活空間の構成は，そこで生活を行う人の動きと密接に結びついている．生活空間の設計者が，このような環境における空間の三次元形状情報を取得して，生活する人の動きと生活空間を構成する幾何学的形状を把握することで，生活空間の改築や新たな設計の検討材料として役立てることができる．例えば，生活空間の設計者が，取得した三次元形状情報を確認することで，学校やオフィスビルのような屋内環境において，災害発生時に人の移動を妨げるような建物内部の構成を評価できる．さらに，生活空間の設計者が空間構成の危険箇所の改築方法の検討材料としても役立てることができる．屋外環境においても，生活空間の設計者が三次元形状情報を用いることで，人が移動する通路における移動可能範囲を評価したり，新たな空間の建物を設計することに役立つ．

2.1.2 従来の研究

三次元形状情報すなわち距離画像を取得できる装置は，以下のような様々な装置が研究および開発され，一部は販売されている．距離画像とは，画像を取得する装置から空間における対象物までの多数の距離からその位置情報を集めたものである．

ステレオカメラによって取得されたカメラ画像から，空間における対象物までの距離を計算することで距離画像を取得する方法がある．カメラにより撮影された画像を用いることで，高速な距離画像の取得および密に分布した距離の位置情報による距離画像を取得できる．特に山本らによって開発された全方向ステレオシステム (SOS)[1] は，複数の小型カメラを用いることで装置全体を小型化して，空間における全天球の視野を確保して距離画像を取得できる．

カメラのような受動型センサに対して，自ら光源を用いることで距離情報を得て距離画像とする能動型センサが数多く存在する．この能動型センサは，二次元的なセンサアレイを用いる方法や MEMS によるミラーを用いる方法を用いることで，いくつかの装置が実用化されている [2][3][4]．これらは，センサ前方の視野を持ち，高速に距離画像を取得できる小型の装置である．

二次元平面内の広い視野の距離情報を高速に取得できる小型の二次元測域センサ [5][6] が開発され，ロボット等の環境認識に広く用いられている．このセンサは，センサのユーザにとって使いやすい SCIP (Sensor Communication Interface Protocol) コマンドインターフェイス [7] を備えており，ユーザは容易にセンサから距離情報を取得できる．このような二次元平面内を走査する二次元測域センサ本体を駆動することで，三次元空間の距離画像を取得する三次元測域センサが開発されている．二次元測域センサ本体を一個または二個の駆動モータを用いて，その横方向軸回りもしくは直行する二軸を駆動回転させることにより，距離情報を得てこれらの情報から距離画像を構成する [8][9]．このような方法を用いることで，空間における全天球の視野を確保した距離画像を取得できる．

森らは二次元測域センサを回転式揺動機構を用いて三次元的に揺動させる走査方式を考案した [10]．この方式は，アクチュエータの等速無限回転によって二次元測域センサのケーブル等がねじれることなく三次元的な走査を可能とし，三次元測域センサの小型化，高速な走

査，視野の広い走査および走査面に幅を持たせた走査を可能とする．

一方，油田らは使い易い三次元測域センサのために SCIP-3D コマンドシステムを策定している [11]．このコマンドシステムはユーザとセンサ間のインターフェイスであり，誰もが容易に使いやすい実用的な三次元測域センサの実現を目指すものである．

2.1.3 本研究の目的

本研究の目的は，生活空間の設計者が人の動きや生活空間の幾何学的形状を把握するために三次元形状情報を容易に取得できる，回転式揺動機構と SCIP-3D コマンドシステムを用いた三次元測域センサモジュールを開発することである．三次元測域センサを一つの機能要素としてまとめるモジュール化によって，センサの開発者だけではなく，センサの詳細な構成を知らない生活空間の設計者などが容易に三次元形状情報を取得できる．生活空間の設計者が，人の動きや生活空間の幾何学的形状を把握するために必要な三次元形状情報を以下にまとめる．

- 三次元形状情報は，生活空間の設計者が容易に取得できる．
- 三次元形状情報を取得することによって，人の移動を妨げることがない．
- 取得する三次元形状情報は，三次元空間において移動する人や空間に置かれた机や椅子などである．
- 空間において対象物を見逃さない程度の三次元形状情報である．
- 空間において移動する人の動きを把握できる三次元形状情報である．
- 人の動きや空間形状が識別できる三次元形状情報である．
- 環境中の照明条件に左右されにくい三次元形状情報である．

生活空間の設計者が必要な三次元形状情報を取得できる三次元測域センサモジュールの概要について，以下にまとめる．

- センサモジュールのユーザが，センサモジュールを容易に制御できるインターフェイスを持つ．これによりユーザは容易に距離画像を取得して，これを確認できる．
- センサモジュールを空間に設置をすることで，人の移動を妨げない小型のセンサモジュールである．
- センサモジュール回りの三次元空間において，垂直の高さ方向を軸として移動する人や空間に置かれた机や椅子など空間の高さ方向の三次元形状情報を主に取得するために，センサモジュールにおける水平方向の視野を広く取り，高さ方向に幅を持つ帯状の視野を持つ．

- 対象物を見逃さないために、対象物においてなるべく均一に分布した距離の位置情報の集合すなわち距離画像を取得できる。
- 空間において移動する人の動きを把握するために、高速に距離画像を取得できる。
- 人の動きや空間形状が識別できる程度に距離情報の分解能を持つ。
- 環境中の照明条件に左右されにくく、安定して距離画像を取得できる。

私は、油田らが策定した SCIP-3D コマンドシステムと、森らが考案した二次元測域センサを回転式揺動機構を用いて三次元的に揺動させる走査方式を用いて、ユーザが容易に距離画像を取得できる三次元測域センサモジュールを構成する。

2.2 目標とする三次元測域センサモジュールの仕様と性能

本節では，目標とする三次元測域センサモジュールの仕様と性能を示す．以下に，2.2.1 節でセンサモジュールの走査方式および 2.2.2 節で測距性能について述べる．

2.2.1 走査方式

開発・試作する三次元測域センサモジュールでは，回転式揺動機構により二次元測域センサを縦方向にもスキャンする方式を用いる．以下，この走査方式において二次元測域センサ部による走査 1 回分のデータを 1 ライン，回転式揺動機構による垂直方向の走査 1 回分のデータを 1 フィールドと呼ぶことにする．

2.2.2 測距性能

二次元測域センサ部による走査速度は，三次元空間におけるセンサモジュールによる，なるべく均一な走査の分布を実現するために 10 ミリ秒とする．垂直方向の走査速度は，0.2 秒から 1.0 秒を可変とし，1 フィールド/秒 (100 ライン/フィールド) から 5 フィールド/秒 (20 ライン/フィールド) まで，0.1 秒毎に 9 段階の走査速度の切り替えを可能とする．なお，このセンサモジュールの垂直方向の視野角は内部の回転式揺動機構のロッドを長さを変えることにより，30 °から 120 °の範囲で容易に変更可能とする．表 2.1 に開発するセンサモジュールの仕様を示す．

表 2.1: Target performance of 3D SOKUIKI sensor module

Scanning rotation [sec]	1.0	0.2
Maximum measuring distance [m]	30	30
Measure of precision in each X , Y , Z direction [cm]	± 5	± 5
Number of line in one field	100	20
Number of point in one line	440	440
Number of point in one field	44,000	8,800
Horizontal view angle [degree]	270	270
Vertical view angle [degree]	30-120	30-120
Weight [kg]	1.5	1.5
Power consumption [W]	15.25	15.25
(2D SOKUIKI sensor unit)	(8)	(8)

2.3 SCIP-3D mini コマンドシステムの設計

私は、開発する回転式揺動機構を用いた三次元測域センサモジュールのために、油田らが策定した SCIP-3D に準拠した、その最小セットとも言うべきコマンドシステムとして、SCIP-3D mini を定義した。以下、2.3.1 節でこのコマンドシステムのユーザプログラムインターフェイス、2.3.2 節で通信方式、2.3.3 節で各コマンドの概要、2.3.4 節でコマンドおよびレスポンスの基本構造および 2.3.5 節でコマンドの詳細について述べる。

2.3.1 ユーザプログラムインターフェイス

ユーザプログラムインターフェイスとして、三次元測域センサのためのインターフェイス仕様 (SCIP-3D) の最小セットとして SCIP-3D mini を定義し、これを三次元測域センサモジュールに実装する。

油田らが策定した SCIP-3D では、センサの基本的な仕様と通信方法として以下の事柄を定めている。

- センサは二方向の主走査と副走査よりなり、高速な主走査によってラインが形成され、低速な副走査によりフィールドが形成される。
- 主走査と副走査は一定周期とする (その比は整数とは限らないが、既知の分数 b/a で表される)。
- $a \times b$ のラインで表される一回の完全な二次元走査をフィールドと呼ぶ。
- データ要求を「リクエスト」と呼び、測域センサは「リクエスト」に対して最新のデータを出力して、これを「レスポンス」と呼ぶ。
- データ要求は、ライン単位、フレーム単位またはフィールド単位とする。
- 出力データの表現方法には、
 - レーザ反射点の三次元位置
 - レーザ反射点までの距離および方位角度で表される測距方向
 - レーザ反射点の距離とスキャンナンバー (ラインナンバーまたはスポットナンバー)がある。

がある。

2.3.2 通信方式

三次元測域センサモジュールの通信はイーサネットを介して、TCP/IP プロトコルを用いてユーザの装置 (コンピュータ) に接続する。ユーザのコンピュータには開発する三次元測域センサモジュールと時刻の同期をとるために、SNTP (Simple Network Time Protocol) サーバを有することとする。

2.3.3 各コマンドの概要

SCIP-3D mini コマンドシステムでは、ユーザからの「コマンド」に対して測距データ等を「レスポンス」として返信する。なお、ユーザからのリクエストに対するレスポンスが終了す

るまで次のコマンドは受け取らないこととする．コマンドは，制御コマンドおよびデータ要求コマンドの二種類に分類する．

制御コマンドは，以下の 4 種類がある．

- SRC コマンド：回転式揺動機構の回転周期の指定および回転開始
- SBM コマンド：レーザビームの点灯，計測開始およびデータ型の指定
- QBM コマンド：レーザビームの消灯および計測停止
- SCT コマンド：ユーザの装置と時計合わせ

データ要求コマンドは，二次元測域センサ用の SCIP2.0 における GD コマンド [7] に対応する以下の 2 種類のみとする．

- GLP コマンド：ライン単位の計測済みの座標データの送信要求
- GFP コマンド：フィールド単位の計測済みの座標データの送信要求

各コマンドの詳細を 2.3.5 節に示す．

2.3.4 コマンドおよびレスポンスの基本構造

リクエストおよびレスポンスは，全て文字列で表現する．

表 2.2 にリクエストの基本型を示す．ユーザからのリクエストは，3 バイトのコマンド符号と必要に応じて 2 バイトの制御コードを付加して，最後に終端コードを入れる．なお，リクエストに開始コードはなく，コマンド符号で始まる．また，終端コードは LF(Line Feed：ラインフィード) とする．

表 2.3 にレスポンスの基本型を示す．センサからのレスポンスは，ユーザからのリクエストのエコーバックの後に区切りコード，2 バイトのステータスコード，区切りコードと続き，コマンドによっては 12 バイトのセンサの時計値(時:分:秒:マイクロ秒)やレーザ反射点の三次元座標値(XYZ)などのデータを付加して，最後に終端コードを入れる．ステータスコードは 00 でコマンドの正常処理完了を示し，それ以外はそのコマンドの処理において何らかの問題があったことを示す．区切りコードは LF とし，終端コードは LF，LF とする．

表 2.2: Basic type of request

Command symbol	Control code	LF
----------------	--------------	----

表 2.3: Basic type of response

Command symbol	Control code	LF
Status code	LF	
Data	LF	
LF		

2.3.5 コマンドの詳細

- SRC コマンド

SRC(Sub Rotation Cycle) コマンドは、回転式揺動機構の回転周期の指定および回転を開始する。回転周期は 0.2[sec] から 1.0[sec] の 9 段階とする。表 2.4 に SRC コマンドのリクエストの形式を、表 2.5 に SRC コマンドの制御コードの内容を、表 2.6 に SRC コマンドのレスポンスの形式を、表 2.7 に SRC コマンドのステータスコードの内容を示す。SRC コマンドの制御コードでは、回転周期の指定を行う。

- SBM コマンド

SBM(Start Beam and Measure) コマンドは、レーザビームが点灯し、計測を開始させる。表 2.8 に SBM コマンドのリクエストの形式を示す。制御コードは、レスポンスの表現形式を選択するためのコードであるが、SCIP-3D mini では制御コードは一種類のみとする。表 2.9 に SBM コマンドのレスポンスの形式を、表 2.10 に SBM コマンドのステータスコードの内容を示す。

- QBM コマンド

QBM(Quit Beam and Measure) コマンドは、レーザを消灯し、計測を停止する。表 2.11 に QBM コマンドのリクエストの形式を、表 2.12 に QBM コマンドのレスポンスの形式を示す。

- SCT コマンド

SCT(Set Clock by Time) コマンドは、ユーザ側のコンピュータの時計とセンサの時計を合わせることが要求する。このコマンドが発行されるとセンサはユーザ側の SNTP サーバを利用して、自分の時刻とユーザ側の装置の時刻に合わせる。表 2.13 に SCT コマンドのリクエストの形式を、表 2.14 に SCT コマンドのレスポンスの形式を示す。

- GLP コマンド

GLP(Get Line Position) コマンドは、ライン単位で計測済みのレーザ反射点までの座標データの送信を要求する。コマンド受信時以前に計測した最新の 1 ライン分のデータおよびそのデータを取得した時刻値よりなる。1 ライン分の計測データは各計測に対する反射点の三次元座標値 (X, Y, Z) である。時計値 (時:分:秒:マイクロ秒) および三次元座標値 (XYZ) のデータを、1 ライン分 (N 個) を返す。時刻値は、そのラインの走査の先頭位置での時計値とする。三次元座標値の各 X, Y, Z 値は、6 バイトで -30,000mm から 30,000mm とする。反射を検出できなかったエラー時は、(0 0 0) を返す。表 2.15 に GLP コマンドのリクエストの形式を、表 2.16 にステータスコードが 00 でないときの GLP コマンドのレスポンスの形式を、表 2.17 に GLP コマンドのステータスコードの内容を、表 2.18 にステータスコードが 00 のときの GLP コマンドのレスポンスの形式を示す。

- GFP コマンド

GFP(Get Field Position) コマンドは、フィールド単位で計測済みの反射点の座標データの送信を要求する。レスポンスはコマンド受信時における最新の1フィールド分の計測済みデータであり、時刻値および各レーザ反射点の三次元座標値 (X, Y, Z) のデータ (1フィールド分) よりなる。その形式は時計値 (時:分:秒:マイクロ秒) および1ライン分 (N 個) の三次元座標値 (XYZ) のデータを単位として、1フィールド分よりなる。時刻値は、各ライン毎に付加され、その走査の先頭位置での時計値である。三次元座標値の各 X, Y, Z 値は、6バイトで-30,000mm から 30,000mm とする。反射を検出できなかったエラー時は、(0 0 0) を返す。表 2.19 に GFP コマンドのリクエストの形式を、表 2.20 にステータスコードが 00 でないときの GFP コマンドのレスポンスの形式を、表 2.21 に GFP コマンドのステータスコードの内容を、表 2.22 にステータスコードが 00 のときの GFP コマンドのレスポンスの形式を示す。

表 2.4: Request type of SRC command

'S'	'R'	'C'	Control code	LF
-----	-----	-----	--------------	----

表 2.5: Substance of control code of SRC command

Control code	Substance
02	0.2 [sec]
03	0.3 [sec]
04	0.4 [sec]
05	0.5 [sec]
06	0.6 [sec]
07	0.7 [sec]
08	0.8 [sec]
09	0.9 [sec]
10	1.0 [sec]

表 2.6: Response type of SRC command

'S'	'R'	'C'	Control code	LF
Status code	LF			
LF				

表 2.7: Substance of status code of SRC command

Status code	Substance
00	Command received without any error
01	Rotation already started
02	Control code is other than designated value

表 2.8: Request type of SBM command

'S'	'B'	'M'	Control code (01)	LF
-----	-----	-----	-------------------	----

表 2.9: Response type of SBM command

'S'	'B'	'M'	Control code	LF
Status code	LF			
LF				

表 2.10: Substance of status code of SBM command

Status code	Substance
00	Command received without any error
01	Laser already lighted up
02	Control code is other than designated value
03	Rotation is not yet started

表 2.11: Request type of QBM command

'Q'	'B'	'M'	LF
-----	-----	-----	----

表 2.12: Response type of QBM command

'Q'	'B'	'M'	LF
'0'	'0'	LF	
LF			

表 2.13: Request type of SCT command

'S'	'C'	'T'	LF
-----	-----	-----	----

表 2.14: Response type of SCT command

'S'	'C'	'T'	LF
'0'	'0'	LF	
Clock value	LF		
LF			

表 2.15: Request type of GLP command

'G'	'L'	'P'	LF
-----	-----	-----	----

表 2.16: Response type of GLP command (In case where status code is not 00)

'G'	'L'	'P'	LF
Status code	LF		
LF			

表 2.17: Substance of status code of GLP command

Status code	Substance
01	Laser has been lighted
02	Designated data type is difference

表 2.18: Response type of GLP command (In case where status code is 00)

'G'	'L'	'P'	LF
'0'	'0'	LF	
Clock value	LF		
Three dimensional coordinate value 1	LF		
....	LF		
Three dimensional coordinate value N	LF		
LF			

表 2.19: Request type of GFP command

'G'	'F'	'P'	LF
-----	-----	-----	----

表 2.20: Response type of GFP command (In case where status code is not 00)

'G'	'F'	'P'	LF
Status code	LF		
LF			

表 2.21: Substance of status code of GFP command

Status code	Substance
01	Laser has been lighted
02	Designated data type is difference

表 2.22: Response type of GFP command (In case where status code is 00)

'G'	'F'	'P'	LF
'0'	'0'	LF	
Clock value	LF		
Three dimensional coordinate value 1	LF		
....	LF		
Three dimensional coordinate value N	LF		
Clock value	LF		
Three dimensional coordinate value 1	LF		
....	LF		
Three dimensional coordinate value N	LF		
....	LF		
Clock value	LF		
Three dimensional coordinate value 1	LF		
....	LF		
Three dimensional coordinate value N	LF		
LF			

2.4 ハードウェアの構成と実装

2.2 節に示した目標仕様を満たす三次元測域センサモジュールを，森らが考案した二次元測域センサを回転式揺動機構を用いて三次元的に揺動させる走査方式を用いて構成し，実現した．実現したセンサモジュールのハードウェアは，二次元測域センサ部，回転式揺動機構およびコントローラにより構成した．本節では，2.4.1 節でハードウェア構成を概説し，2.4.2 節で二次元測域センサ部，2.4.3 節で三次元揺動機構および 2.4.4 節でコントローラの各部について説明する．

2.4.1 開発した三次元測域センサモジュールのハードウェアの構成

三次元測域センサモジュールのハードウェアは，二次元測域センサ部，回転式揺動機構，揺動コントローラおよびメインコントローラにより構成した．図 2.1 に構成した三次元測域センサモジュールと各構成要素の写真を示す．

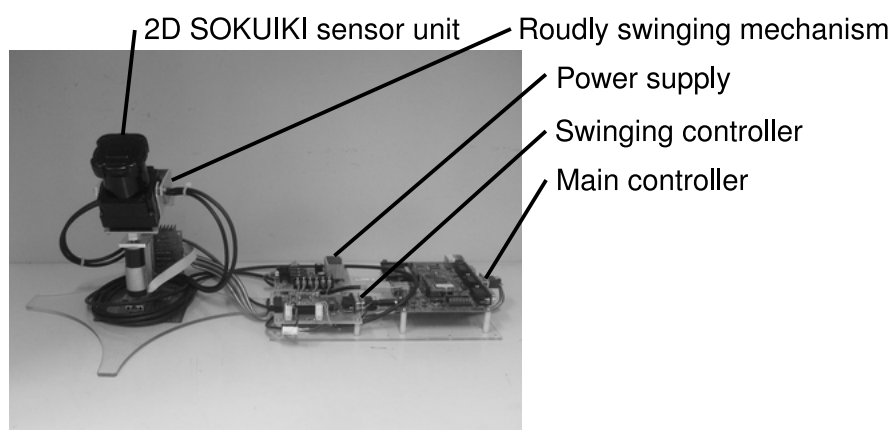


图 2.1: Image of 3D SOKUIKI sensor module

2.4.2 二次元測域センサ部

北陽電機は、長距離型測域センサ (UTM-30LX) をベースに、高速回転用の特殊モータやその制御回路を開発して走査回転数を上げ、100Hz でライン走査を行う高速回転型二次元測域センサ (UTM-X002S) を開発した。その測距系自体は市販の屋外用測域センサ UTM-30LX とほぼ同じであり、レーザ光をパルス状に発射して反射を検出するまでの時間を測定する TOF(Time of Flight) 方式により測距を行っている。この二次元測域センサ部は市販の UTM-30LX 型 (走査同期：40Hz) に比較して走査速度が 2.5 倍となっているが、逆に一走査における反射点数は $1/2.5$ に減少し、 270° の視野角の中で 440 の反射点の距離を計測する。三次元測域センサモジュールでは高速な走査を実現するために、この高速回転型二次元測域センサ (UTM-X002S) を用いる。

2.4.3 三次元揺動機構

揺動機構の概要

回転式揺動機構は、二次元のフリージンバル機構により、固定された一点を中心に、測域センサの軸をセンサモジュール本体に斜交させて回転させるメカニズムよりなる。このメカニズムの特徴は、回転により駆動されるにも拘らず、センサの正面方向がほぼ上下に動くだけで、回転軸回りにほぼ一定の方向を保つことである。このため二次元測域センサ部の視野がすべて有効に活きると共に、これに接続するケーブルにねじれが発生することがない。

図 2.2 に構築した三次元測域センサモジュールのメカニズム部の写真を示す。図 2.3 に二次元測域センサの姿勢と位置の変化の様子を示す。

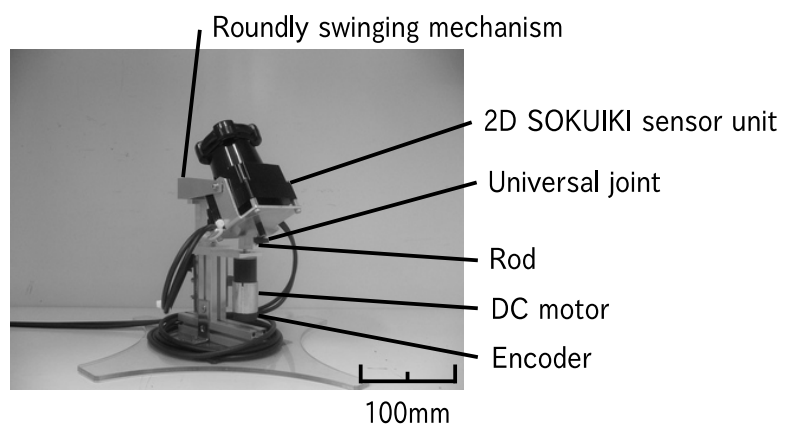


図 2.2: 2D SOKUIKI sensor unit and roundly swinging mechanism

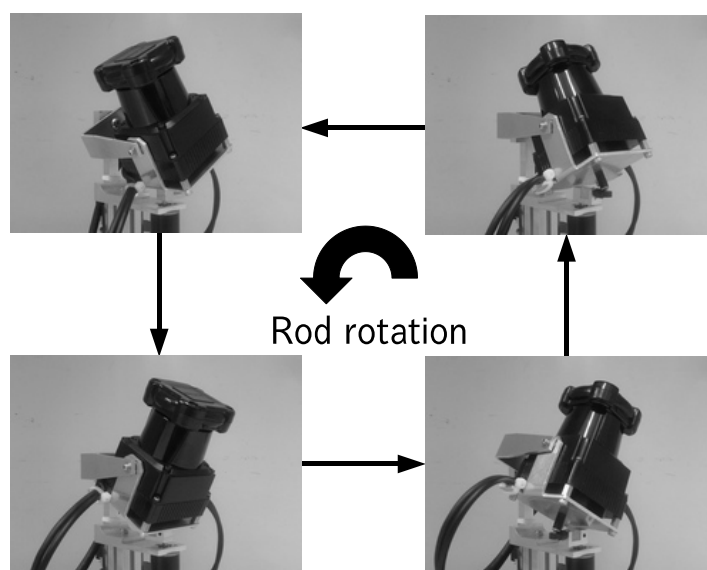
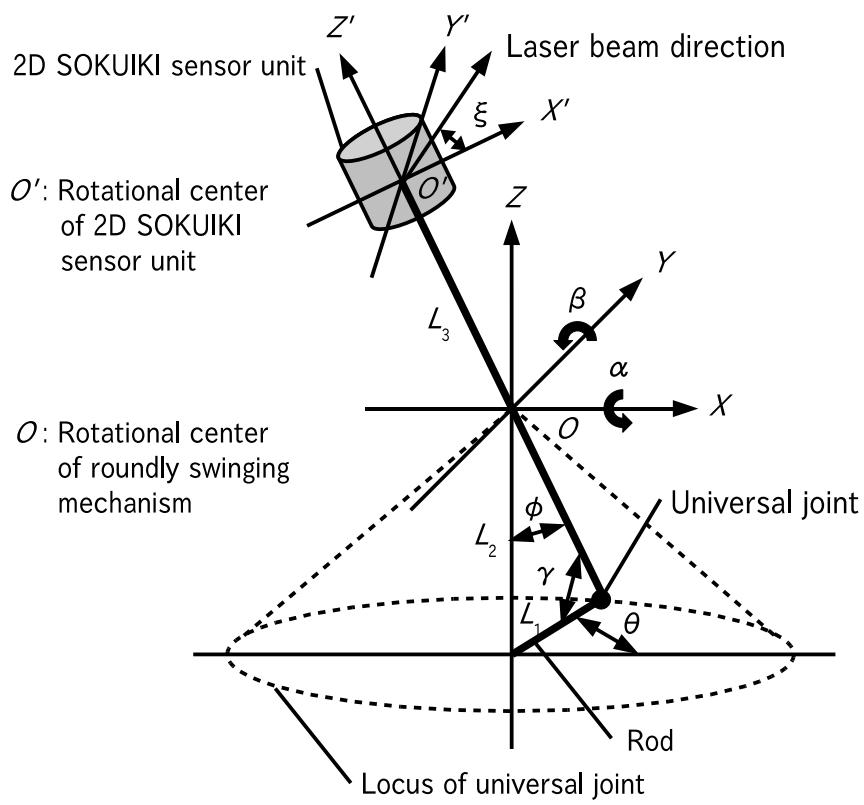


図 2.3: Changing position of 2D SOKUIKI sensor unit by rod rotation

揺動部の動き

図 2.4 に回転式揺動機構における二次元測域センサ部の姿勢の動きを示す．ここでは，センサモジュール本体の揺動機構の回転中心を O とし，正面を X 軸，垂直方向を Z 軸とした座標系を X - Y - Z とし，また二次元測域センサ部に固定した座標系と，その中心を O' とし，正面方向を X' ，走査回転軸を Z' とする座標系を X' - Y' - Z' で表している．回転式揺動機構は，その回転ロッドの回転角度 θ が変化することにより二次元測域センサ部の垂直軸 Z' を揺動させる．回転式揺動機構の支持台はフリーなジンバル機構により，まずは X 軸回りに角度 α 回転し，その後 Y 軸回りに角度 β 回転する．なお，ここで構築した回転式揺動機構では，回転ロッドの長さを L_1 ，ロッドの回転中心から揺動機構の回転中心までの長さを L_2 および揺動機構の回転中心から二次元測域センサ部の光学中心までの長さを L_3 と定義した．



☒ 2.4: Coordinate system

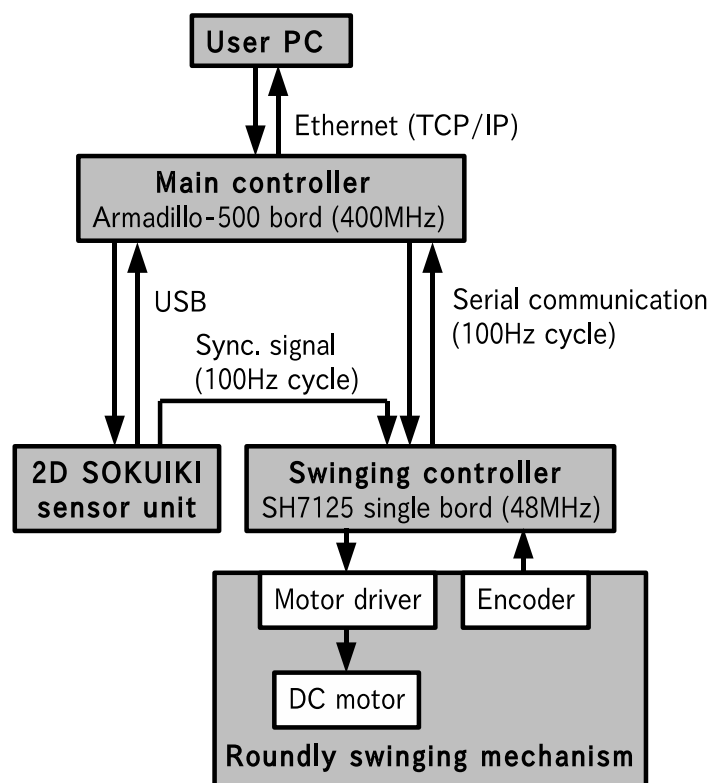
揺動部の駆動方法

三次元揺動機構の回転部は、本体下部に設置されたロッドおよび減速機の付いた DC モータにより駆動される。揺動発生部のメカニズムは、ロッドおよびロッドの回転によりセンサ軸の斜交回転軸の向きを変化させるためのユニバーサルジョイントにより構成される。ロッドは一方方向に回転することで揺動動作が生成されるため、DC モータの回転を一定速度とする。そこで揺動コントローラは、DC モータに付属しているエンコーダにより回転数を取得し、一定速度で回転するように制御する。なお、揺動の周期は揺動回転部の機械的性能や二次元測域センサ部のケーブルの材料特性により、5Hz 程度を限界とした。

2.4.4 コントローラ

私は、本センサモジュールの制御系を、二次元測域センサ部の内部で回転走査やレーザ送受波の制御および距離計算を行う内蔵コンピュータの他に、測距の制御と三次元反射点位置の計算を行うメインコントローラ、および主に揺動機構の DC モータを制御する揺動コントローラを用いて構成した。

図 2.5 に本センサモジュールのコントローラの構成を示す。二次元測域センサ部は 100Hz の周期で回転走査しながら、レーザ光を発射して反射点までの測距を行う。その測距要求およびデータの取得は、メインコントローラから USB インターフェイスを介して行う。揺動コントローラは、メインコントローラより与えられた回転周期で揺動機構が運動するように DC モータを等速回転制御し、また、二次元測域センサ部より一走査毎に出力される同期信号を受けて、シリアル通信で揺動機構の回転角度をメインコントローラに送信する。メインコントローラは 100Hz の周期で二次元測域センサ部により得られた距離データからレーザ反射点の三次元位置を計算する。また、メインコントローラは、イーサネットを介してユーザの PC に接続され、ユーザの PC の要求に応じて TCP/IP プロトコルでユーザの PC と通信を行う。



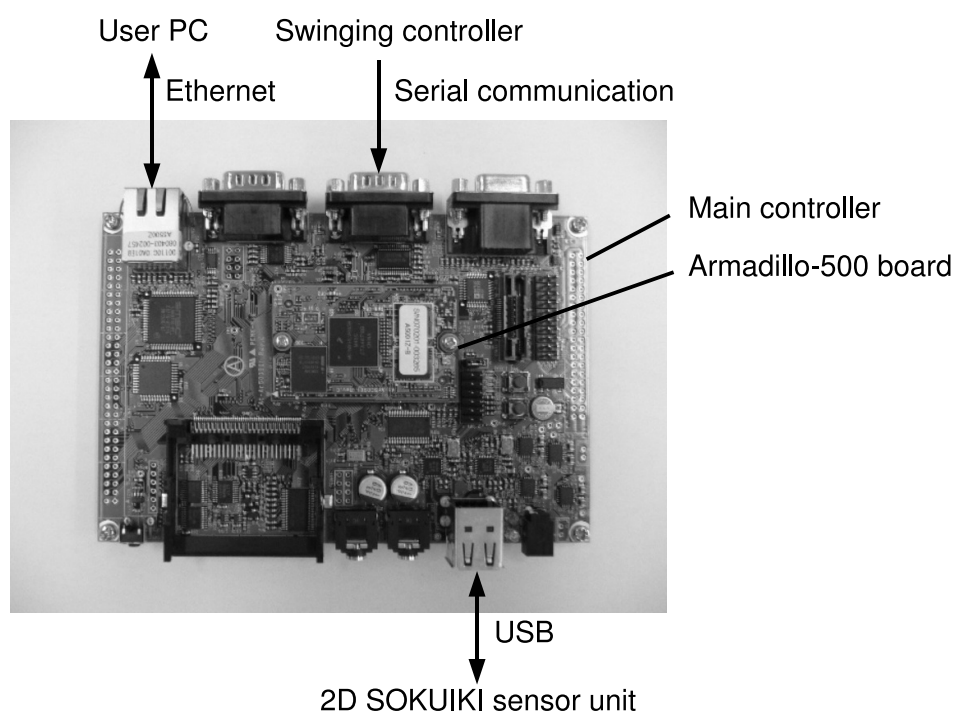
☒ 2.5: Structure of controller

メインコントローラ

図 2.6 に示すメインコントローラでは，下記の処理を行う．

- ユーザとイーサネットを介して，コマンドやデータの授受
- 各々のレーザ反射点の三次元位置を求めるための座標変換
- USB を介した二次元測域センサ部からのデータの取得
- 揺動コントローラからシリアル通信による回転式揺動機構の回転角度値の取得

これらの処理を実現するためのメインコントローラとして，アットマークテクノ社の Armadillo-500 ボード (Linux 搭載) を用いることとした [21]．Armadillo-500 ボードは，ARM1136JF-S(クロック数：400MHz) を CPU コアとした i.MX31L プロセッサと，浮動小数点演算のためにベクタ浮動小数点コプロセッサを搭載している．またイーサネット，USB ホストおよびシリアル通信の各機能を有する．



☒ 2.6: Main controller

揺動コントローラ

図 2.7 に示す揺動コントローラには，下記の機能が必要である．

- 回転式揺動機構を駆動する DC モータの速度制御
- DC モータのエンコーダのパルス信号のカウント
- 二次元測域センサ部からの 100Hz の周期の同期信号をトリガとする，DC モータの回転角度値のシリアル通信を介したメインコントローラへの送信

これらの機能のため，揺動コントローラとしてルネサステクノロジ社の SH-2 を CPU コアとした SH7125(クロック数：48MHz) シングルボードを用いることとした [22]．SH7125 は，PWM 出力，タイマー，位相計数，割り込みおよびシリアル通信の各機能を有する．

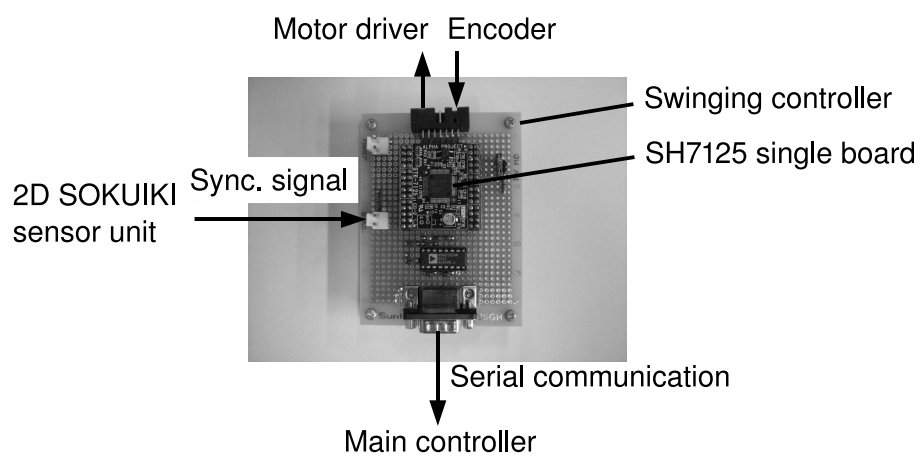


図 2.7: Swinging controller

2.5 ソフトウェアシステム

構成したハードウェアに対して，そのハードウェアの制御，取得した反射点位置の計算およびコマンドインターフェイスのためのソフトウェアを実装した．以下その詳細に関して，2.5.1 節でソフトウェアの構成，2.5.2 節で揺動機構の制御系および 2.5.3 節でメインコントローラ上のプロセスについて述べる．

2.5.1 ソフトウェアの構成

私は、三次元測域センサモジュールのソフトウェアを、センサモジュールの揺動機構を制御する揺動コントローラ内の処理プロセス、および、メインコントローラ内にあって二次元測域センサ部の測距データの取得と処理を行う三次元計算プロセス、および、同じくメインコントローラ内で独立に働きながらユーザ側のコンピュータからのコマンドを解釈し、必要な処理を行うコマンド処理プロセスにより構成した。各コントローラにおける処理の概要を図 2.8 に示す。

図 2.9 に本システムの実行時に SCIP-3D mini の GLP コマンドが与えられた時のデータ取得と処理および通信のタイミングを示す。

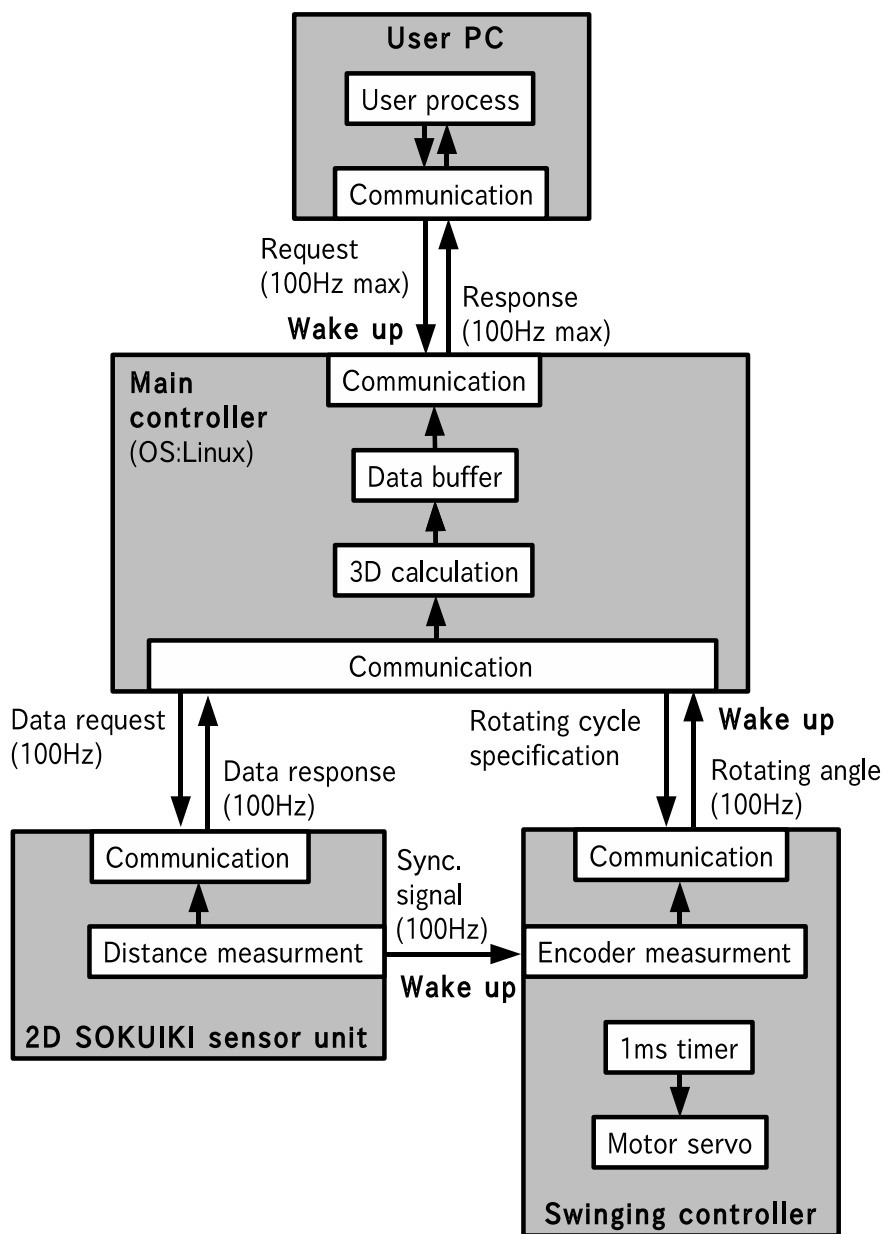
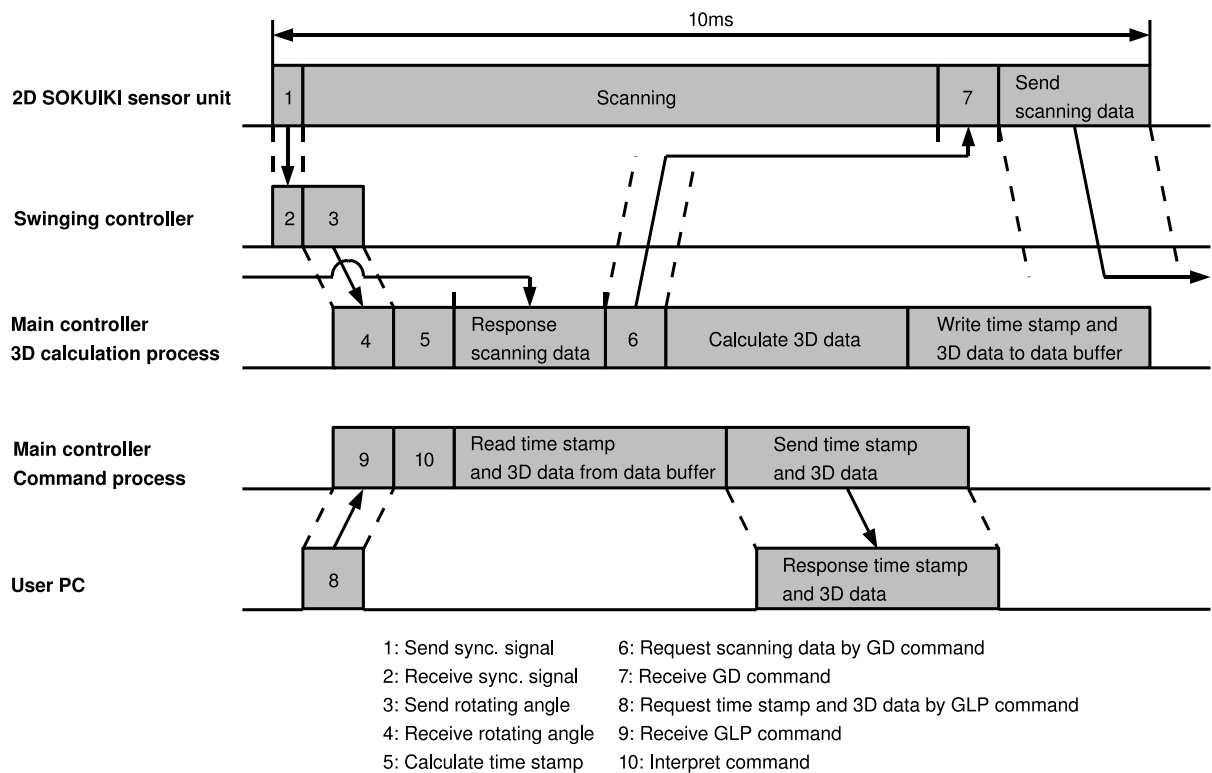


図 2.8: Process of controller



☒ 2.9: Timing diagram of process in case of GLP command

2.5.2 揺動機構の制御系

揺動コントローラでは、回転式揺動機構が測域センサの周期に同期して定速回転するよう DC モータを 1kHz のサンプリングレートで PI 制御している。また、エンコーダのパルス信号をカウントした値から DC モータの回転角度値を算出する。その値をメインコントローラへ送信する。その処理は二次元測域センサ部から 100Hz の周期で送信される 1 ビットの同期信号をトリガとする割り込みにより起動する。

なお揺動コントローラの実行環境は、OS を用いないシングルタスク処理とし、プログラムは C で記述し、実装した。

2.5.3 メインコントローラ上のプロセス

メインコントローラ上では、10 ミリ秒毎に二次元測域センサデータを取得して反射点の三次元の位置計算を行うプロセスと、ユーザコンピュータからの TCP/IP 通信を介したコマンドに対し処理を行うコマンド処理プロセスが実行され、これらは計算結果の測距データを記憶する共有メモリによりデータの授受を行っている。

なお、メインコントローラの実行環境は Linux を使い、プログラムは C で記述した。

三次元反射点位置の計算法

二次元測域センサ部の走査で得られる物体表面のレーザ反射点の $X'-Y'-Z'$ 座標系の位置は、二次元測域センサ部の走査回転角を ξ 、その向きの反射点までの距離を d とすると

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d \cos \xi \\ d \sin \xi \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

で与える。

固定されている $X-Y-Z$ 座標系と二次元測域センサ部の $X'-Y'-Z'$ 座標系の関係は図 2.4 より、二次元フリージンバル機構の X, Y 軸回りの角度 α, β によって

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \text{Rot}(X, \alpha) \text{Rot}(Y, \beta) \text{Trans}(0, 0, L_3) \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

で表される。一方回転ロッドの回転運動による $X-Y-Z$ 座標系と $X'-Y'-Z'$ 座標系の関係は、回転ロッドの角度を θ とすると、回転ロッド先端部のユニバーサルジョイントの角度を ϕ と

して

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \text{Rot}(Z, \theta) \text{Rot}(Y, -\phi) \text{Rot}(Z, \gamma)$$
$$\text{Trans}(0, 0, L_3) \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

で表される．ここで L_3 は回転ロッドの長さで決まるパラメータで

$$\tan \phi = \frac{L_1}{L_2} \quad (2.4)$$

である．式 (2.2) と式 (2.3) を連立させて， α と β の関係を求めると

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{L_1 \sin \theta}{L_2} \right) \quad (2.5)$$

$$\beta = -\tan^{-1} \left(\frac{L_1 \cos \theta \cos \alpha}{L_2} \right) \quad (2.6)$$

が得られる．二次元測域センサ部で得られた測距データ列と揺動機構の角度 θ より，これらの式 (2.1)，式 (2.2)，式 (2.5) および式 (2.6) を用いて環境中の物体表面のレーザ反射点の三次元位置を求める．

二次元測域センサデータ取得と三次元反射点位置計算プロセス

本プロセスは揺動コントローラからシリアル通信を介して回転式揺動機構の回転角度値が送られてくることにより起動する．まず，二次元測域センサ部より前回の実行時に発行したデータ要求に対応した，測距データを受信する．次いで，次のセンサデータを得るため二次元測域センサ部に対してデータ要求コマンドである GD コマンド [7] を発行して 1 ライン分の測距データを取得し，一走査毎の距離データの個々について三次元座標値を計算してデータバッファに格納する．

なお，タイムスタンプ値は二次元測域センサ部の各ラインにおける先頭の測距の位置での時計値であり，この時刻値の取得は揺動コントローラから送信される回転角度値の受信をタイミングとして，回転角度値の送信および処理時間を逆算することにより計算する．また，計算された反射点位置は，1 ラインおよび 1 フレームを単位としてメモリ上にファイルとして出力し，これをコマンド処理プロセスが読み出すことにより排他制御を実現する．

コマンド処理プロセス

コマンド処理プロセスでは，ユーザ側のコンピュータから送られてくるリクエストを解釈し，対応する処理を行う．

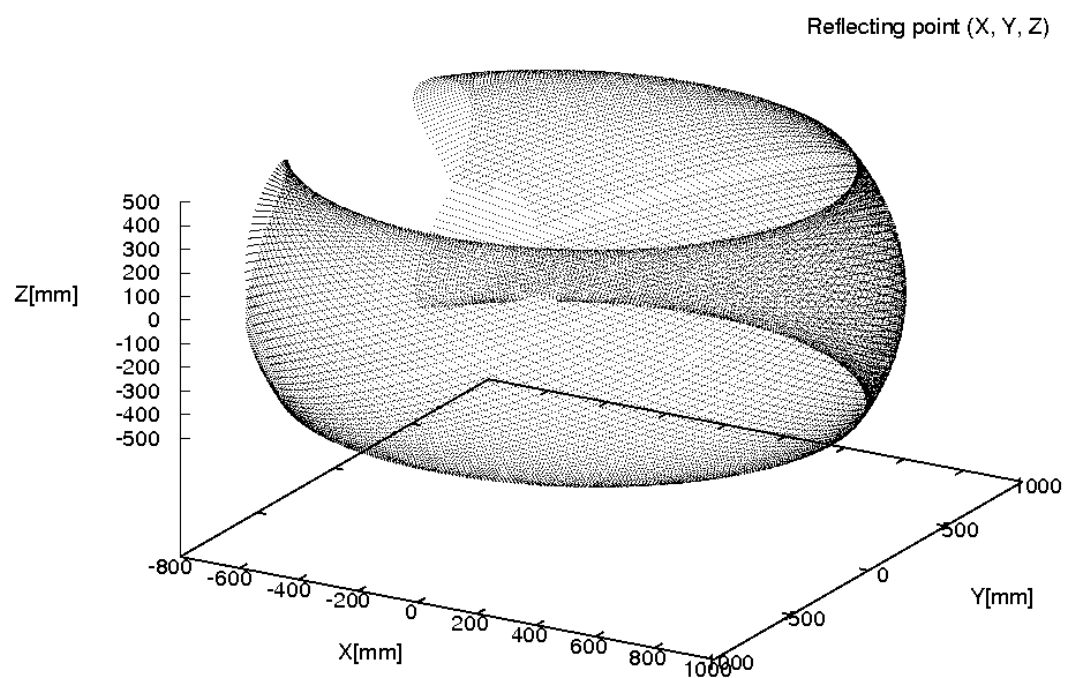
2.6 開発したセンサモジュールの測距領域の確認

実現した三次元測域センサモジュールの測距領域を確認した．以下，2.6.1 節で測距領域確認のための実験および 2.6.2 節でその結果について述べる．

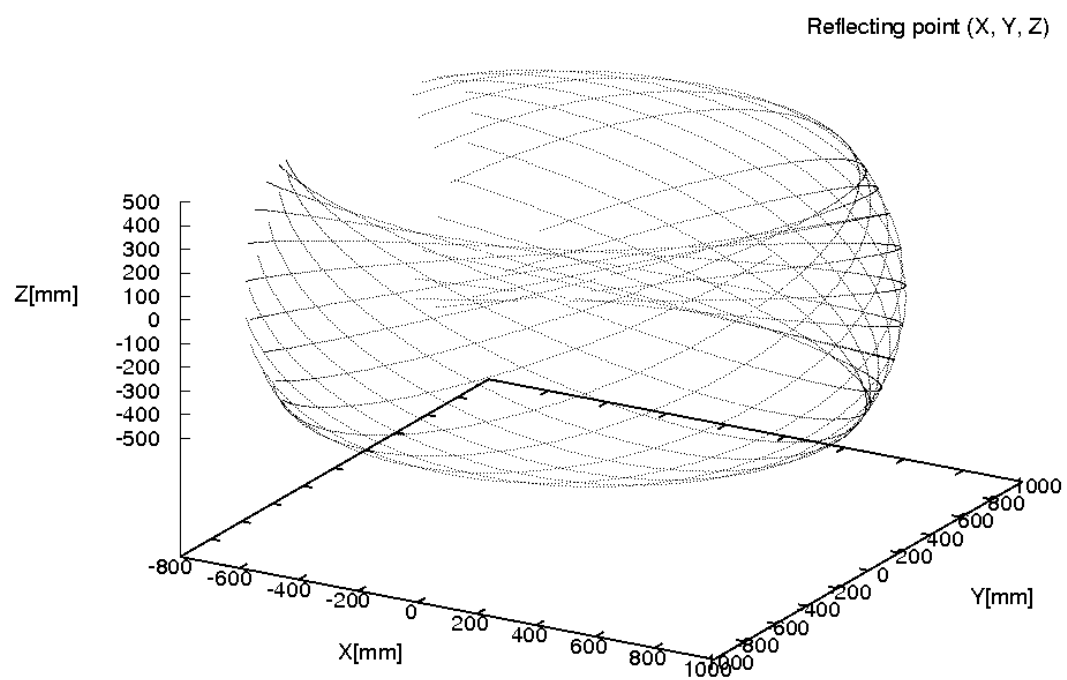
2.6.1 測距領域確認のための実験

実験のために構築した三次元測域センサモジュールでは，可変可能な垂直方向の視野角を実験的に 56.5° とした．回転式揺動機構における，回転ロッドの長さを $L_1=27.0\text{mm}$ ，ロッドの回転中心から揺動機構の回転中心までの長さを $L_2=50.2\text{mm}$ および揺動機構の回転中心から二次元測域センサ部の光学中心までの長さを $L_3=27.3\text{mm}$ として，視野角を実現した．

図 2.10 および図 2.11 に本センサモジュールによって測距が行われる方向の集合を示す．図 2.10 は，走査の周期を 1.0 秒とし，測域センサで得られる距離を 1m とした時の測距点を示したものである．図 2.11 には，走査を高速として 0.2 秒とした時の測距方向を各々点としてを示している．



☒ 2.10: Set of reflecting point (X, Y, Z) of constant distance (1 [m]) in case of 1.0 [sec] scanning rotation



☒ 2.11: Set of reflecting point (X, Y, Z) of constant distance (1 [m]) in case of 0.2 [sec] scanning rotation

2.6.2 結果

図 2.10 および図 2.11 から，センサモジュールの垂直方向の軸を中心とした帯状の領域が測距される．測距点の密度分布は走査領域の上下端である程度密となっているが，全体として比較的均一となる．図 2.11 から 5Hz の走査でこれだけの二次元的な方向の測距が可能となる．このように，このセンサモジュールは周方向についてはかなり密に，上下方向に対しては疎に反射点の位置を計測することができる．

2.7 開発したセンサモジュールの測距精度の確認

実現した三次元測域センサモジュールの目標とする測距精度を確認した。以下、2.7.1 節で測距精度確認のための実験、2.7.2 節でその結果および 2.7.3 節で実現したセンサモジュールの測距精度について述べる。

2.7.1 測距精度確認のための実験

実現した三次元測域センサモジュールでは，内部の二次元測域センサ部における測距精度の他に，揺動機構の歪みやタイムスタンプ処理の精度等の誤差要因が存在し得る．試作したセンサモジュールがそれらの影響を受けず定めた仕様を満たしていることを確認するため，実験室内でその部屋の形状を測定する実験を行い，実測したその部屋の形状と比較を行った．実験を行ったのは筑波大学第三エリア L 棟 3L307 号室である．

図 2.12 に測定した実際の内部空間の様子を示す．この測定においてはロッドの回転周期は 0.2 秒とした．図 2.13 から図 2.16 に実験で得られた 1 フィールド分のレーザ反射点の集合を示す．図 2.13 は三次元表示，図 2.14 は平面上の投影表示，図 2.15 は $X-Z$ 面の投影表示，図 2.16 は $Y-Z$ 面の投影表示である．この空間は，梁やパイプなどの突起物を除くと，壁から壁および床から天井における大きさが $14.80\text{m} \times 7.30\text{m} \times 3.10\text{m}$ である．点はセンサモジュールで取得した反射点を，実線は実際の空間の梁やパイプなどの突起物を除いた，壁から壁および床から天井の大きさを示す．取得した反射点の測距精度の確認のため，反射点の集合の一部を拡大表示して図 2.17 に示す．



3D SOKUIKI sensor module

図 2.12: Image of 3L307 room

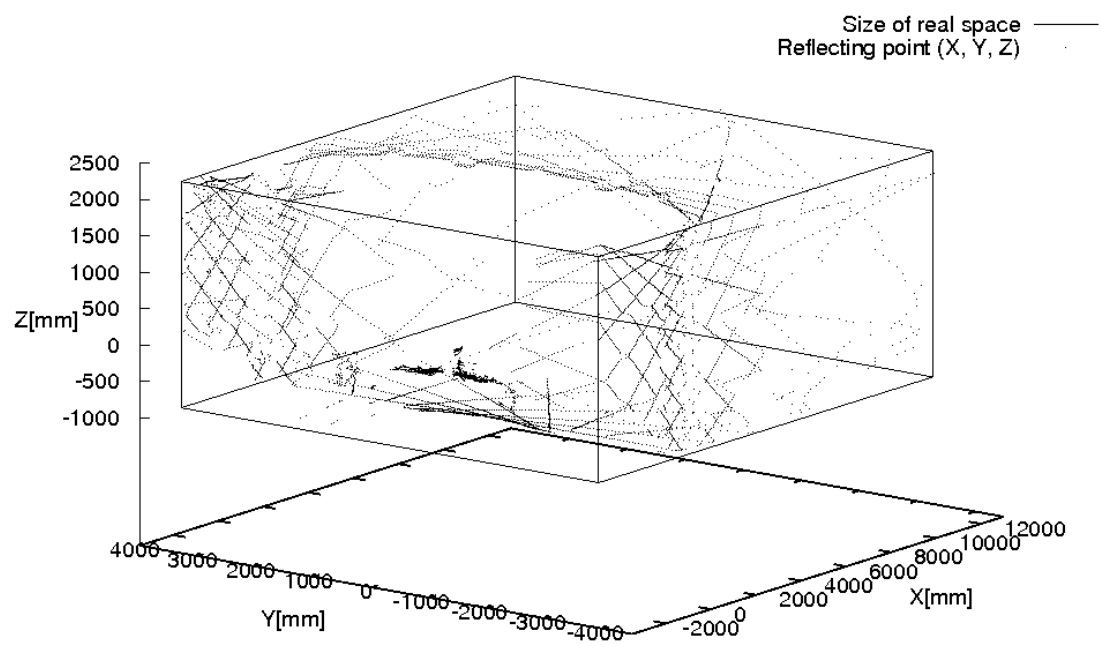


图 2.13: X - Y - Z plot of reflecting point (X, Y, Z) in 3L307 room

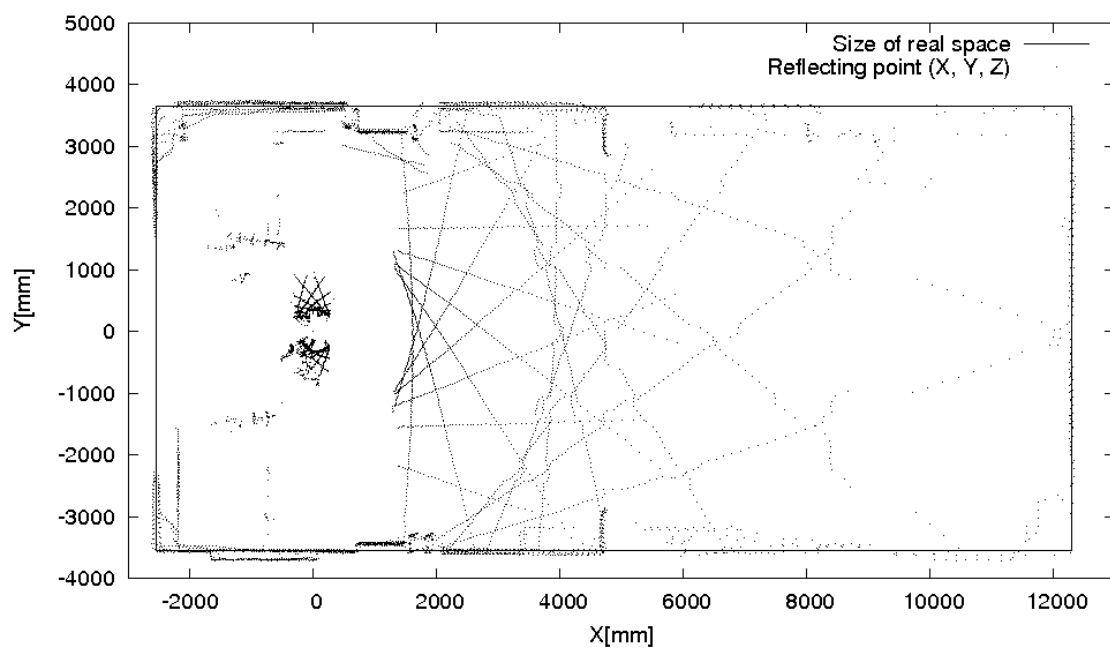


图 2.14: X - Y plot of reflecting point (X, Y, Z) in 3L307 room

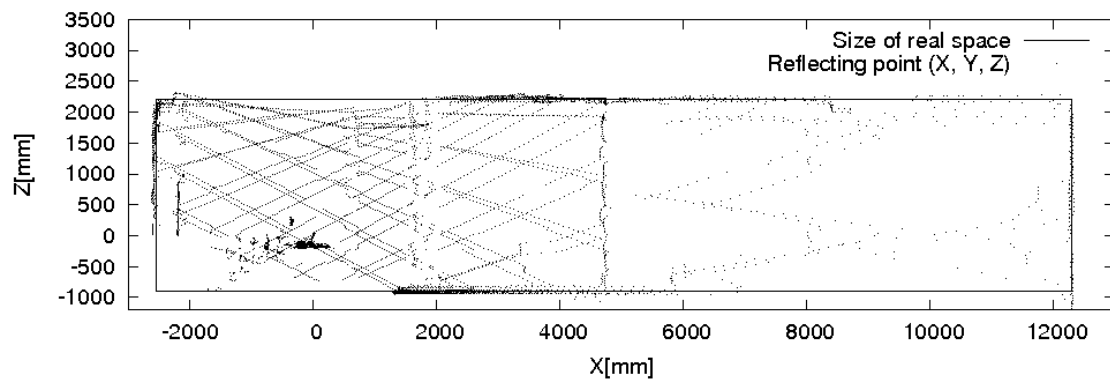


Fig. 2.15: X-Z plot of reflecting point (X, Y, Z) in 3L307 room

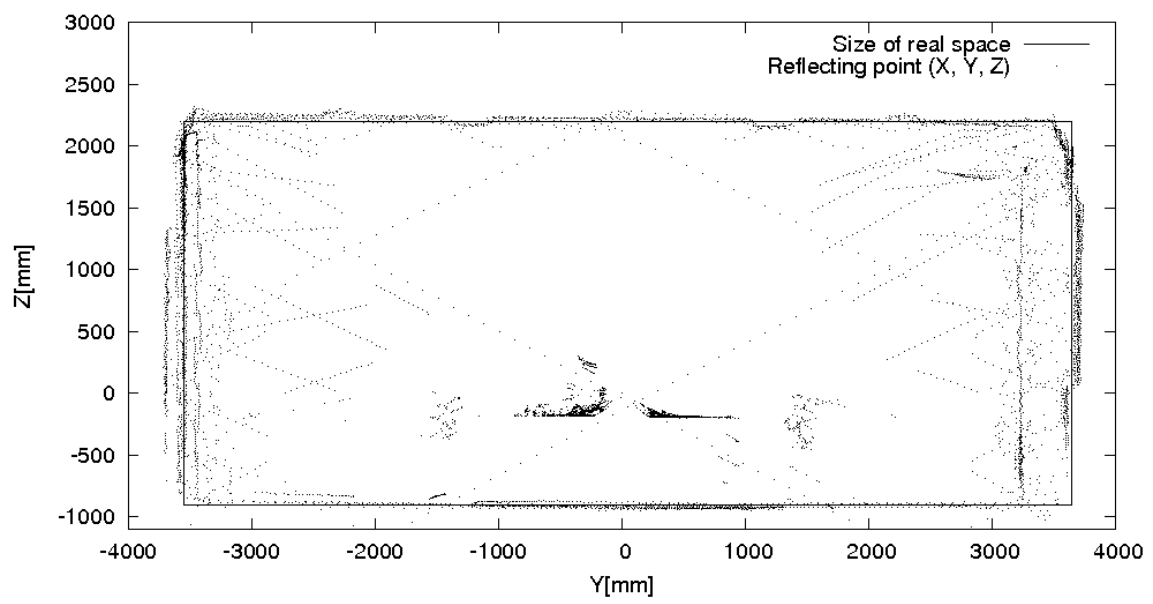
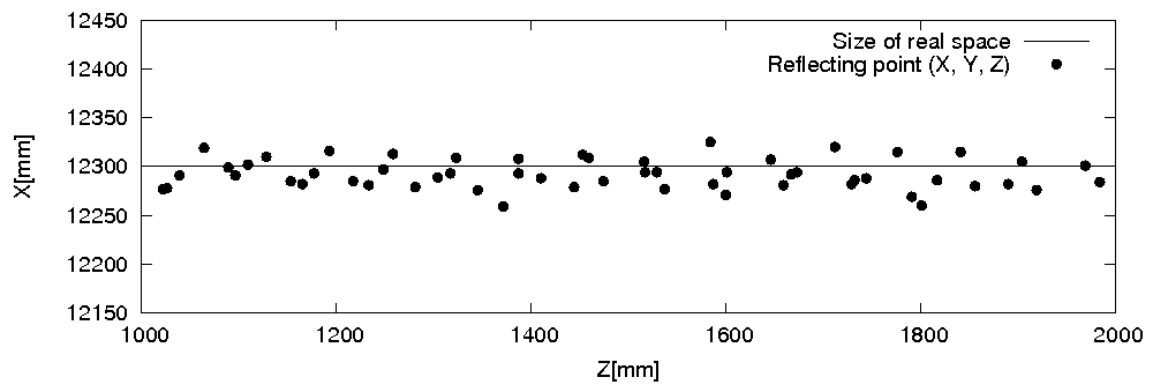


図 2.16: Y - Z plot of reflecting point (X, Y, Z) in 3L307 room



⊠ 2.17: Part of X - Z plot of reflecting point (X, Y, Z) in 3L307 room

2.7.2 実験結果

図 2.13 から図 2.16 の測定点とその形状を示す実線の比較より，壁から壁および床から天井においては，ほぼ形状通りの反射点データが得られていることが分かる．図中，測定点と室内の形状を示す実線が一致しない部分は，室内の梁やパイプなどの突起物の存在が理由である．

図 2.17 は X - Z 面の投影の一部であるが，センサモジュールから壁までの距離が 12.30m であるのに対して，反射点位置は本センサモジュールにおける目標の仕様である $\pm 5\text{cm}$ の範囲内にあることが分かる．

2.7.3 実現したセンサモジュールの測距精度

実験の結果確かめられた精度は，目標の $\pm 5\text{cm}$ 以内であった．よって，実現した三次元測域センサモジュールは目標とした仕様を満たしている．

2.8 開発したセンサモジュールによる環境観察の例

本節では実現した実際の三次元測域センサモジュールを用い、屋内の環境でリアルタイムで環境を観察する実験を行った。以下、2.8.1 節で実験室内の形状の観察、2.8.2 節で屋外環境の観察および 2.8.3 節で動物体を含む環境の観察の例を示す。

2.8.1 実験室内の形状の観察

私は、実現した三次元測域センサモジュールを図 2.18 に示す筑波大学第三エリア L 棟 3L402 号室の室内に設置した。ユーザの PC よりセンサモジュールに、SRC コマンドを発行して回転式揺動機構の回転を開始して、SBM コマンドを発行してレーザビームを点灯して計測を開始して、GFP コマンドを発行して三次元反射点群のフィールド単位の座標データを取得した。取得したデータをユーザの PC の画面上に三次元表示した。

図 2.19 は 1 フィールドの計測時間を 1.0 秒とした時の 1 フィールド分の測距データである。図 2.18 と図 2.19 の比較から、空間内部に置かれたテーブル、ソファ、本棚およびホワイトボードなどの静止物の形状について、物体の形状を示す反射点データが取得できることが分かる。

表 2.23 は本センサモジュールから壁までの、反射点および実測値の平均距離の比較を示す。反射点まで距離は、本センサモジュールにおける目標の仕様である $\pm 5\text{cm}$ の範囲内にあることが分かる。



3D SOKUIKI sensor module

図 2.18: 3L402 room for experiment in indoor environment

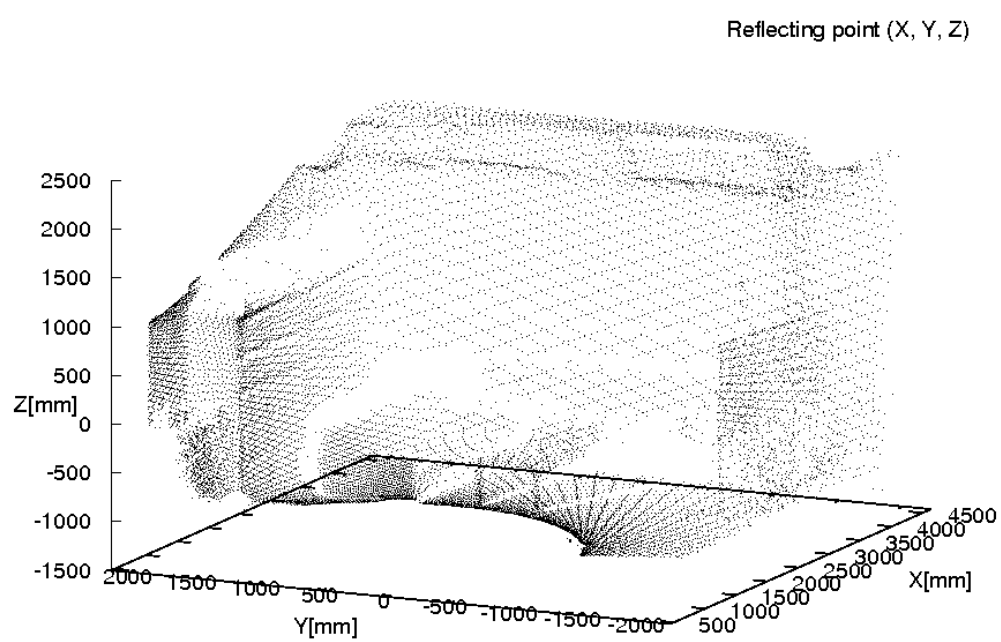


図 2.19: Result and reflecting points (X, Y, Z) in 3L402 room

表 2.23: Comparisons with average distance between reflecting point and actual distance from sensor module to wall in indoor environment

Direction	X	Y	Z
Reflecting point [mm]	4,520	1,850	2,325
Actual distance [mm]	4,511	1,847	2,332

2.8.2 屋外環境の観察

私は、実現した三次元測域センサモジュールを図 2.20 に示す屋外環境である筑波大学第三エリア L 棟入口付近に設置した。ユーザの PC よりセンサモジュールに、SRC コマンドを発行して回転式揺動機構の回転を開始して、SBM コマンドを発行してレーザビームを点灯して計測を開始して、GFP コマンドを発行して三次元反射点群のフィールド単位の座標データを取得した。取得したデータをユーザの PC の画面上に三次元表示した。

図 2.21 は 1 フィールドの計測時間を 1.0 秒とした時の 1 フィールド分の測距データである。屋外環境における建物の形状について、実際の形状通りの反射点データが取得できることが分かる。

表 2.24 は本センサモジュールから壁までの、反射点および実測値の平均距離の比較を示す。反射点まで距離は、本センサモジュールにおける目標の仕様である $\pm 5\text{cm}$ の範囲内にあることが分かる。



3D SOKUIKI sensor module

図 2.20: Front of 3L building for experiment in outdoor environment

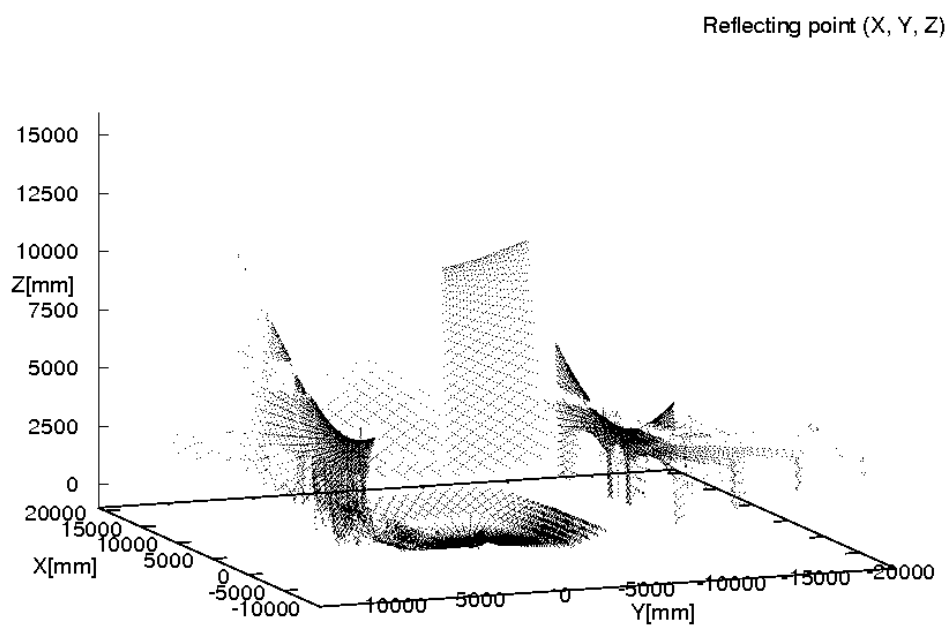


図 2.21: Result and reflecting points (X, Y, Z) for outside of 3L building

表 2.24: Comparisons with average distance between reflecting point and actual distance from sensor module to wall in outdoor environment

Direction	X	Y
Reflecting point [mm]	17,273	8,032
Actual distance [mm]	17,288	8,040

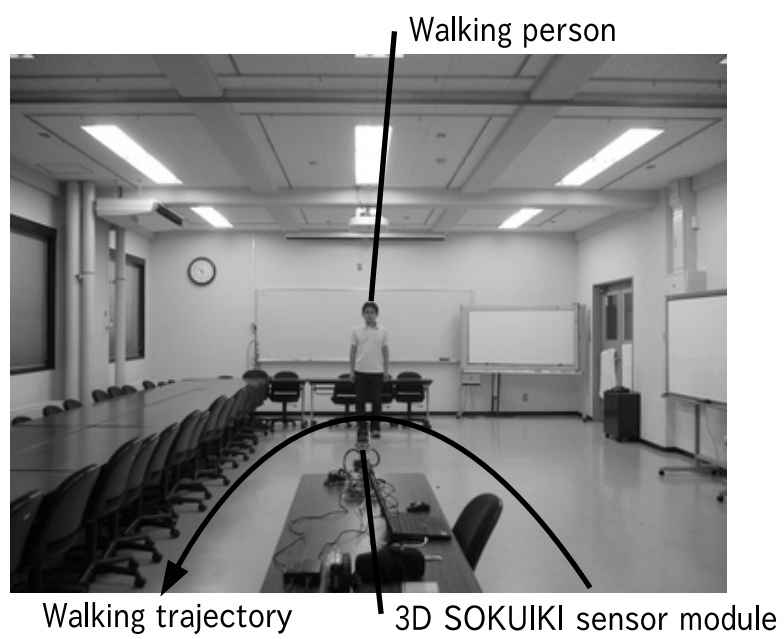
2.8.3 動物体を含む環境の観察

実現した三次元測域センサモジュールは、移動する人を識別するために 0.2 秒周期で環境の三次元形状を得ることができる。これを評価するために歩く人間を含む環境の測定を行った。

私は、実現したセンサモジュールを図 2.22 に示す筑波大学第三エリア L 棟 3L307 号室の室内に設置した。ユーザの PC よりセンサモジュールに、SRC コマンドを発行して回転式揺動機構の回転を開始して、SBM コマンドを発行してレーザビームを点灯して計測を開始して、GFP コマンドを発行して三次元反射点群のフィールド単位の座標データを取得した。取得したデータをユーザの PC の画面上に三次元表示した。

図 2.22 に測定した空間と人間の動いた軌跡を示す。実験を行ったのは筑波大学第三エリア L 棟 3L307 号室であり、壁から壁および床から天井における大きさが 14.80m × 7.30m × 3.10m である。

図 2.23 と図 2.24 に本センサモジュールで取得した歩く人間の反射点 (X, Y, Z) の集合を示す。図 2.23 は 1 フィールドの計測時間が 1.0 秒の場合を、図 3.1 は 1 フィールドの計測時間が 0.2 秒の場合を示す。それぞれ 1.0 秒および 0.2 秒ごとに測距データを取得してリアルタイムで PC の画面上に 1 フィールド分の反射点位置を表示したものである。なお歩く人間の測距データを見やすくするために、これらの図では実験空間の壁のデータは表示していない。1 フィールドの計測時間が 1.0 秒の場合、歩く人間の形が二重に見えることがある。これは回転式揺動機構と二次元測域センサによる走査方式の影響である。しかし 1 走査が高速でフィールドの計測時間が 0.2 秒の場合では、人間は停止しているように見え、取得した反射点は歩く人間の形を示すことが分かる。人間が歩く程度の速さの移動物体についてはリアルタイムに正確な反射点を取得できている。



☒ 2.22: Image of 3L307 room

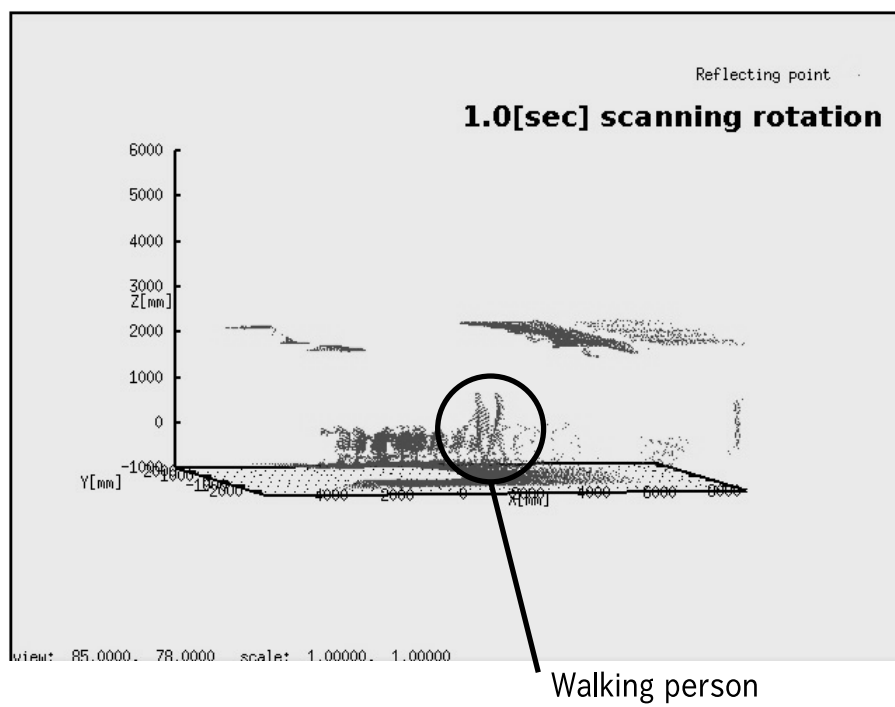


図 2.23: Results of reflecting point (X, Y, Z) by 1.0 [sec] scanning rotation

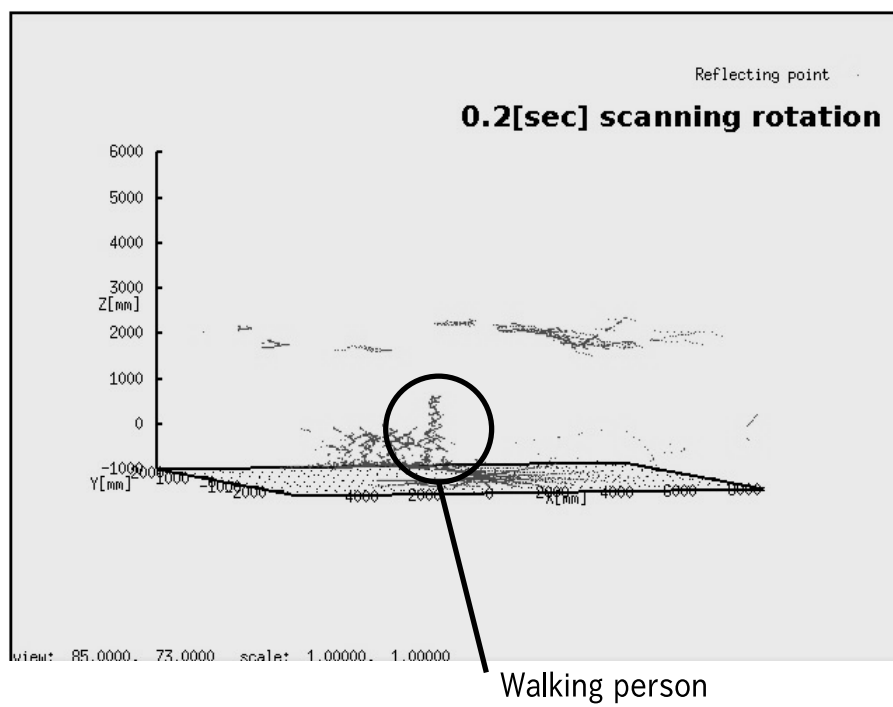


図 2.24: Results of reflecting point (X, Y, Z) by 0.2 [sec] scanning rotation

2.9 第2章の結論

私は、生活空間の設計者が人の動きや生活空間の幾何学的形状を把握するために三次元形状情報を容易に取得できる、回転式揺動機構と SCIP-3D mini コマンドシステムを用いた三次元測域センサモジュールを実現した。三次元測域センサを一つの機能要素としてまとめるモジュール化によって、センサの開発者だけではなく、センサの詳細な構成を知らない生活空間の設計者などが容易に三次元形状情報を取得できる。三次元測域センサモジュールは、森らが考案した二次元測域センサを回転式揺動機構を用いて走査する方式と、油田らが策定した SCIP-3D コマンドインターフェイスに準拠して、私が定義した SCIP-3D mini コマンドシステムをインターフェイスとして、さらにこれらを制御するコントローラおよびソフトウェアを用いることで構成した。実現したセンサモジュールの仕様は以下の通りである。

- センサモジュールの視野は、水平方向に 270° 、垂直方向は可変可能な $30\text{--}120^\circ$ と三次元空間において帯状の視野を持つ。
- 対象物においてほぼ均一に分布したレーザ反射点の集合を取得する。
- 最速 0.2 秒で、高速に三次元空間の反射点を取得できる。
- 反射点の分解能として、測距精度は $\pm 5\text{cm}$ である。
- レーザ光線による測距を行うために、環境中の照明条件に左右されにくい。
- センサモジュールの大きさは、比較的小型である。
- SCIP-3D mini コマンドシステムにより、センサモジュールのユーザが容易に三次元反射点の位置を取得できる。

本章では実現した三次元測域センサモジュールを用いて、屋内および屋外環境の計測結果を示した。この結果より目標とするセンサモジュールの仕様において、実際に人が生活する屋内および屋外環境の生活空間の三次元形状、および歩いて移動する人の三次元形状を得られることが示された。

三次元測域センサモジュールは、そのモジュール化によってセンサの開発者だけではなく、センサの詳細な構成を知らないユーザが容易に三次元形状情報を取得できる。そのために、既にこのセンサモジュールは、開発者以外の筑波大学知能ロボット研究室内のユーザによって、人の動きの検出 [23] や移動ロボットを用いた屋内の三次元地図生成 [24] など、それぞれの研究のために使われている。

第3章 屋内形状の特徴を用いた可搬型の三次元移動量推定・環境地図生成システム

私は、学校やオフィスビルにおける屋内内部の広い範囲において、生活空間の設計者が三次元形状地図を容易に取得して、その地図を確認することができる、屋内形状の特徴を用いた可搬型の三次元移動量推定・環境地図生成システムの開発を目的として、環境形状を表す空間中のレーザ反射点を測定するセンサシステムのハードウェアのプロトタイプを構築した。また、そのシステムを人間が持ち歩きながら計測した屋内環境の形状から、センサ自体の移動量を逐次推定するアルゴリズムを考案して、実際にこのシステムに実装した。以下、3.1 節で本章の序論、3.2 節で屋内形状の特徴を用いた可搬型の三次元移動量推定・環境地図生成システムに必要な機能とシステム構成、3.3 節でハードウェアの構成、3.4 節で移動量の計算と地図生成、3.5 節で姿勢の測定、3.6 節で移動量の推定、3.7 節で実験による有効性の確認、3.8 節で実験と結果および 3.9 節で本章の結論について述べる。

3.1 第3章の序論

屋内形状の特徴を用いた三次元移動量推定アルゴリズムと、このアルゴリズムを実装した可搬型の三次元移動量推定・環境地図生成システムについて、3.1 節でその研究の背景、3.2 節で関連する従来の研究および 3.3 節で本研究の目的について以下に述べる。

3.1.1 研究の背景

学校やオフィスビルなどの屋内施設において、多くの人たちが快適に施設を利用するために、生活空間の設計者はその生活空間の構成を把握する必要がある。生活空間の設計者が、施設の空間内において生活する人たちにとって生活しやすい空間構成を把握することで、空間構成の改善や新たな設計を行うことができる。そのために、学校やオフィスビルにおける屋内内部の広い範囲において、生活空間の設計者が三次元形状地図を容易に取得して、その地図を確認することができるようにしたい。人がセンサシステムを持ち運べて、実時間で地図を生成できて、かつその空間の形状の違いが分かる精度をもつセンサシステムが求められている。

3.1.2 従来の研究

屋内環境における空間の形状を把握する方法としては、主に空間における二次元平面上の地図を用いられることが多い。この二次元平面地図は、人の手により空間形状を計測して、この計測データを元にして手動で二次元平面地図を作成していたために、多くの時間が費やされた。このため、近年移動ロボットとロボットに搭載されたレーザ測距センサを用いることで、その生成を行う手法が報告されている [12][13]。

一方、人が生活する学校やオフィスビルのような実際の空間は、二次元平面ではなく、高さ方向の形状を持つ三次元空間である。三次元の形状情報を持った三次元空間の地図を生成する必要がある。二次元平面地図の生成と比較して、さらに時間がかかる屋内環境における三次元地図の生成では、移動ロボットとロボットに搭載されたレーザ測距センサを用いることで、その生成を行う手法が報告されている [14][15]。移動するロボットによって取得できるオドメトリと、レーザ測距センサを用いてロボットの移動に沿って取得される三次元形状情報、およびこれらの形状情報をマッチングさせることで三次元地図を生成する。オドメトリとは、移動ロボットの車輪の回転速度から移動速度を求め、これを積分してロボットの位置と姿勢を求めるものである。また移動ロボットを用いることなく、人がレーザ測距センサを手で持ち運ぶことで三次元環境地図を生成する装置が、コクヨにより実現されている [16]。この装置では、人が空間中を持ち運ぶセンサと、空間中に固定および設置する別個の装置が必要となる。

三次元地図を生成する手法について考えると、多くの移動体による地図生成の研究では、時系列によって取得した空間のポイントクラウドとしての形状情報を繋ぎ合わせることで、地図を生成する SLAM(Simultaneous Localization and Mapping) の考えを利用している [17]。このポイントクラウド形式の形状情報を繋ぎ合わせるためには、ICP(Iterative Closest Point)[18] や IDC(Iterative Dual Correspondence)[19] などの局所的マッチング手法が多く用いられている。局所的マッチングを正確に行うためには、空間形状において取得されるポイントクラウドがなるべく均一に分布していることが重要である。

一方、阪東らは二次元の空間形状の中で地図を作ることを目的として、測距センサから取得した屋内環境の特徴的な直角平行な面の二次元形状情報のみを用いることで移動するセン

サの二次元平行移動量を推定して、この推定値を用いて二次元形状情報をつなぎ合わせて地図を生成する手法を報告している [20]。この方法は、センサから取得される二次元形状情報のみを用いてセンサの二次元平行移動量を推定するために、移動するロボットによって取得するオドメトリ情報が不要であり、この情報なしでも正確な二次元環境地図を生成することができる。また、空間形状における比較的疎なポイントクラウドの分布の条件下でも、かなり精確に移動量を推定することができ、誤差の累積による地図の精度への影響を抑えることができる。

3.1.3 研究の目的

上記のような従来の方法を踏まえて、本研究では以下の条件を満たす屋内環境において三次元環境地図を生成する方法を開発し、その試作システムを実現することを目的とした。

- 屋内環境の三次元空間において、三次元形状情報としてレーザ反射点のポイントクラウドを取得する。
- 屋内環境の直角平行な面の特徴を利用して、取得したポイントクラウドから移動するシステムの回転量および三次元移動軌跡を推定する。
- 推定した回転量および三次元移動軌跡を用いて、ポイントクラウド形式により三次元形状地図を生成する。

3.2 屋内形状の特徴を用いた可搬型の三次元移動量推定・環境地図生成システムに必要な機能とシステム構成

私は、屋内形状の特徴を用いた可搬型の三次元移動量推定・環境地図生成システムを構成する方法を考えて、システムの移動軌跡を推定するアルゴリズムを構築した。本システムの目的は、人がシステムを持ち運び屋内のホール、階段および廊下環境における三次元空間を歩いて移動して、一旦停止してシステムを働かせたとき、システムの三次元空間における移動量を推定して、かつ三次元空間の地図を生成することである。私は、この目的のために屋内環境において人が手で持ち運び移動するときに、この環境を通して働かせて三次元平行移動量すなわち移動軌跡の推定およびこの推定に基づき地図を生成するアルゴリズムを考案した。さらにアルゴリズムの有効性を実証するために、アルゴリズムを実装した実際のシステムを構成して、実空間においてこれを実証した。以下に、3.2.1 節で対象とする環境の分析、3.2.2 節でシステムの実現に必要な機能および 3.2.3 節でシステムの基本構成と設計を説明する。

3.2.1 対象とする環境の分析

学校やオフィスビルなど，ホール，階段および廊下がある一般的な屋内施設の環境を対象とする．図 3.1 に，観察して分析した対象とする屋内環境を構成する空間の一例を示す．その結果，以下の特徴が分かった．

- 屋内空間では，ホールは階段と廊下につながり，廊下から階段および階段から廊下へ移動するときにはホールを通る．
- 屋内環境では，壁，天井，床，柱および階段が存在する．多くのこの種の環境では壁，天井，床および柱と階段の面と側面は，原則として一枚の面から構成されている．この環境において柱の面，柱の側面および壁の面は，それ以外の壁，天井および床の面にそれぞれ 90 °直角に交わっている．
- ホールの壁から壁の幅は，階段や廊下のそれと比較して広くなる．また天井の高さは，ホールでは階段より低く，廊下ではほぼ同じである．
- ホールでは，天井および床は原則として一枚の面から構成されている．
- 階段では，多くの部分で四枚の壁の面により囲まれている．また天井，床および階段の面は，階段環境の高さ方向に複数存在する．さらに一部の壁の面と階段の側面は，ほぼ平行となる．
- 廊下では，壁は原則として一枚の面上に一定間隔で柱が凸状な形を作っている．ここでは柱は壁の面に平行な面と，壁の面と柱の面にそれぞれ 90 °直角に交わる側面から構成される．また天井および床は原則として一枚の面から構成されている．
- このように対象とする屋内環境は，ホール，階段および廊下のそれぞれの空間において，その形状の特徴が異なる．

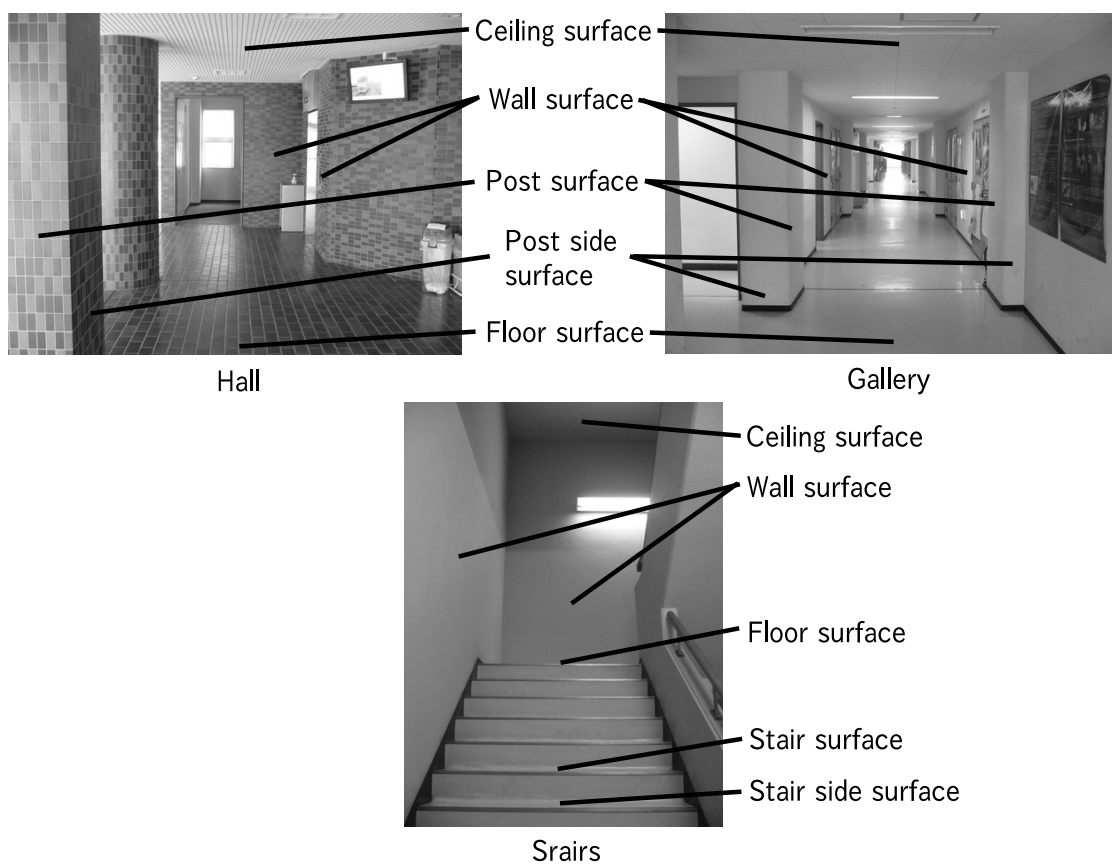


图 3.1: Image of indoor environment

3.2.2 システムの実現に必要な機能

本システムは人が手に持ち移動するために、3 自由度の並進移動量および 3 自由度の回転量の合計 6 自由度をもつ。したがって本システムが有すべき機能は、高速に三次元走査を行って、空間のレーザ反射点における位置データ群の取得、システムの回転量である姿勢の推定、システムの並進移動量の推定、求められたセンサ位置に基づいて、測定された三次元反射点群データを集積して地図を作成することである。これを人間が持って歩ける大きさおよび重量に収めたシステムを構築する必要がある。

3.2.3 システムの基本構成と設計

本システムでは、環境情報の取得に高速に三次元的に走査する測域センサを用いることとし、そのために私が第 2 章で開発した三次元測域センサモジュールの一部である三次元測域センサ部を用いた。システムの姿勢を知るためには、ロールおよびピッチ角については重力・慣性センサを利用し、ヨー角については環境の壁の面が主に直角平行な平面より構成されている性質を用いて、三次元測域センサによる反射点群データを二次元の床面に投影した後、主な壁を表す直線とのなす角により求める。また、システムの三次元的移動量については、屋内廊下環境の性質を用いて三次元反射点データより柱、壁および天井等の面を検出して、その関係から算出することとする。その後三次元反射点データを求められた姿勢と移動量により座標変換して集積することにより、ポイントクラウド形式での環境地図を生成する。これらの機能を実現するため、システムは三次元測域センサ部、姿勢センサ部および情報処理部より構成し、これを人間が持って移動できるように一体化する。

3.3 ハードウェアの構成

本システムのハードウェアは，三次元空間の距離とその方位情報を取得する三次元測域センサ部，システムの姿勢情報を取得する姿勢センサ部および情報処理を行うコントローラ部により構成する．三次元測域センサ部は，二次元測域センサ，回転式揺動機構および回転式揺動機構を制御する揺動コントローラにより構成され，小型で高速かつ広範囲な走査を可能とする本センサを用いて屋内環境の三次元的なレーザ反射点群を取得することとした．また，姿勢センサ部からシステム本体の姿勢情報であるロールおよびピッチ角を取得する．以下に，3.3.1 節で試作システムの構成と各部の役割および 3.3.2 節で試作システムの動作について述べる．

3.3.1 試作システムの構成と各部の役割

本システム構成は，三次元測域センサ，姿勢センサおよび主に三次元移動量の計算および三次元地図を生成するコントローラをコンパクトにまとめ，これを一脚に取り付けたものとなる．

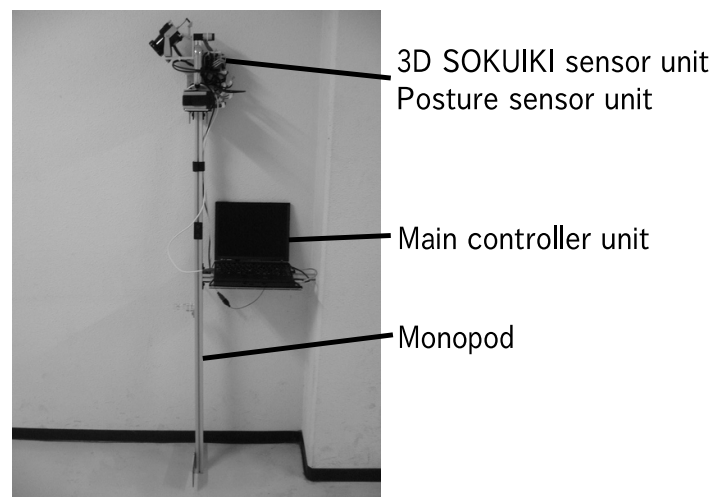
図 3.2 に試作したシステムの三次元測域センサ部，姿勢センサ部，メインコントローラ部および一脚の各部の写真を示す．システムの三次元測域センサ部の座標系は，回転式揺動機構の回転中心を原点 O_s として，システムの正面方向を X_s ，その左方向を Y_s および高さ方向を Z_s として表すこととした．

図 3.3 にシステムとシステムを動かせるユーザの様子を示す．オペレータは，この一脚部分を持つことでシステムを持ち運び，移動する．さらに，屋内環境の床の面において一脚を立てることで三次元測域センサ部で環境データを取得する．

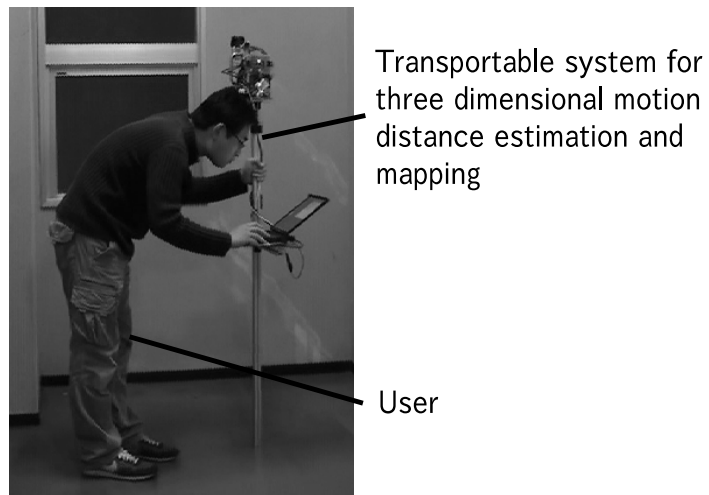
本システムでは，三次元測域センサ部を長さ 1.5m の一脚の先に取り付けることで，三次元走査の有効範囲を最大限生かす構成とした．

システム全体の重量は 6.8kg であり，このうちメインコントローラとしてのノート PC が 1.4kg，姿勢センサが 0.8kg，バッテリーが 0.8kg および一脚が 2.1kg を占めている．本研究における試作システムでは，バッテリーには 12V，2Ah の鉛蓄電池を用いた．

試作するシステムでは，三次元測域センサ部の垂直方向の視野角を 270° ，水平方向の視野角を 90° とした．この視野を確保するために，三次元測域センサ部を図 3.2 に示すように取り付けた．三次元測域センサ部による 1 回の走査で得られる反射点数は 44,000 であり，その測定は毎回 1.0 秒を要する．



☒ 3.2: Developed transportable system for three dimensional motion distance estimation and mapping



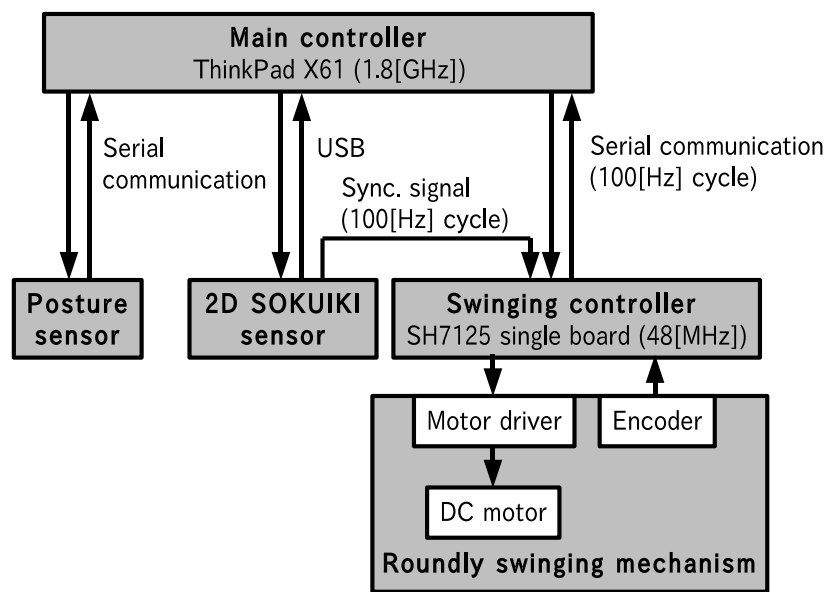
☒ 3.3: Transportable system for three dimensional motion distance estimation and mapping and the user

3.3.2 試作システムの動作

図 3.4 に本システムのコントローラの構成を示す．本システムのコントローラは，揺動コントローラおよびメインコントローラから構成される．二次元測域センサ部は 100Hz の周期で回転走査しながら，レーザ光を発射して反射点までの測距を行う．その測距要求およびデータの取得は，メインコントローラから USB インターフェイスを介して行う．揺動コントローラは，メインコントローラより与えられた回転周期で揺動機構が運動するように DC モータを等速回転制御し，また二次元測域センサ部より一走査ごとに出力される同期信号を受けて，シリアル通信で揺動機構の回転角度をメインコントローラに送信する．またメインコントローラはシリアル通信を介して姿勢センサ部に接続され，姿勢センサ部はメインコントローラからの要求に応じてロールおよびピッチ角の値を送信する．

姿勢センサは重力センサとジャイロ等により構成することができるが，本研究では開発の手間を省くために実験的にクロスボー社の AHRS400CD-200[25] を用いることとした．このセンサのカタログデータによれば，精度は $\pm 0.75^\circ$ 以内であり，出力の更新レートは 50Hz である．このセンサはヨー角や並進移動量も測定して出力する機能を有するが，本試作ではロールおよびピッチ角の測定にのみに用いた．

これらの処理を実現するためのメインコントローラとして，IBM 社製の PC として ThinkPad X61(Linux 搭載)を用いることとした．このノート PC のクロック周波数は 1.8GHz である [26]．



☒ 3.4: Structure of developed system

3.4 移動量の計算と地図生成

屋内環境の三次元移動量の推定では，システムのセンサ情報から屋内環境の直角平行な柱や壁，天井を面として検出し，移動によって変化するその各々の面とシステムのセンサ部との間の距離からセンサ部の移動量を計算する．屋内環境を構成するホール，階段および廊下環境は，それぞれ直角平行な壁や天井の面で構成されるが，それぞれの環境において構成される面の特徴は異なる．そのために，ホール，階段および廊下環境を通した移動量の推定では，これらの環境の異なる特徴を考慮して各環境において各々システムのセンサ部の移動量を求める方法を定め，さらにこれらの環境の間を移動するときに，その移動を判定する条件を定めて各計算方法を切り替える．以下，姿勢および移動量計測の概要について述べる．

三次元空間の形状情報としてポイントクラウドを取得して、取得した位置の異なる各ポイントクラウドを、従来のICPなどのマッチングにより移動量を推定する手法では、ポイントクラウドがなるべく密に分布していることが必要である。そのために、比較的疎な空間形状におけるレーザ反射点位置分布の条件下では正確な移動量の推定が難しい。

そのために、阪東らが報告している屋内環境において特徴的な直角平行な面を利用したセンサの二次元平行移動量を推定する手法を、三次元空間において平行移動量を推定できるように拡張して用いることとする。この手法は、比較的疎な空間形状における距離の位置情報すなわちレーザ反射点位置分布の条件下でも、かなり正確に移動量を推定することができ、誤差の累積による地図の精度への影響を抑えることができています。

システムの三次元測域センサ部の並進移動量を求めるためには、まずセンサシステムから見た環境中のレーザ反射点の各点の座標を三次元測域センサ部のロール、ピッチおよびヨー角を用いて、環境中の床面を X_s - Y_s 平面、壁面の主な方向が X_s 軸方向となるように座標変換する。このときに、ロールおよびピッチ角の計測は姿勢センサ部から取得した値を用い、ヨー角はシステムの三次元測域センサ部が得た反射点群より推定する。ヨー角は、三次元空間内の各反射点の X_s , Y_s 座標値について、 X_s - Y_s 平面内の各方位ごとに投影して一次元の軸上で反射点の頻度を示すヒストグラムを作り、その最大値を与える方向を求めることで、システムの三次元測域センサ部と三次元空間内の壁の面とのなす角として求める。次に、この三次元空間内の反射点データを三次元の各軸方向へ二次元的に投影して求めた反射点の頻度分布を示すヒストグラムにより、システムの三次元測域センサ部から三次元の各面までの距離を求める。このとき、 X_s および Y_s 方向の各々の壁の面までの距離の変化量の関係からシステムの進行方向の変化を判定する。さらにシステムの三次元測域センサ部から柱の側面、壁の面および天井の面までの距離の、それぞれの変化量を三次元方向の各移動量とする。

ホール、階段および廊下はそれぞれ直角平行な壁や天井の面で構成されるが、それぞれの環境における構成の特徴は異なる。そのため、ホール、階段および廊下を通した移動量の推定では、これらの環境の異なる特徴を考慮して各環境において計算方法を用いることとする。さらにこれらの環境の間を移動するときに、その移動を判定する条件を用いて計算方法を切り替える。

また、本システムのオペレータは屋内環境のホール、階段および廊下を通して移動して、階段環境においては階段を上がる方向へ進み、その進行方向を変える時は左回りもしくは右回りに回転してほぼ 90 ° 方向を変えるものとして、センサの姿勢および移動量の推定方法を検討および考案した。

3.5 姿勢の測定

本システムでは，ロールおよびピッチ角は姿勢センサから取得した値を用い，ヨー角は三次元空間とセンサのなす角により求める．以下，3.5.1 節でピッチ角とロール角および 3.5.2 節でヨー角の計算について述べる．

3.5.1 ピッチ角とロール角

本システムでは，ロールおよびピッチ角の計測は姿勢センサ部から取得した値を用いる．姿勢センサのロールおよびピッチ角は，重力の値を用いてこれらの角度を算出している．そのために，姿勢センサは屋内環境における建物の影響を受けずに，ロールおよびピッチ角の値を出力するものである．

3.5.2 ヨー角の計算

一般的な姿勢センサにおけるヨー角の計測では，地磁気を用いており，対象としている屋内環境でこれを計測すると，建物の影響によりその誤差が大きい．そのために，ヨー角はシステムの三次元測域センサ部と三次元空間内の壁の面とのなす角から求めることとした．三次元空間のレーザ反射点群において，三次元空間内の各反射点の X_s, Y_s 座標値について， X_s - Y_s 平面内の各方位ごとに投影して一次元の軸上で反射点の頻度を示すヒストグラムを作り，その最大値を与える方向をヨー角とした．最大値を与える方向を二回求めることで，この二つの値が一致した場合に，求めた最大値を与える方向をヨー角とする．これにより，反射点の頻度を示すヒストグラムにおいて，求める壁の面以外の誤検出を排除している．

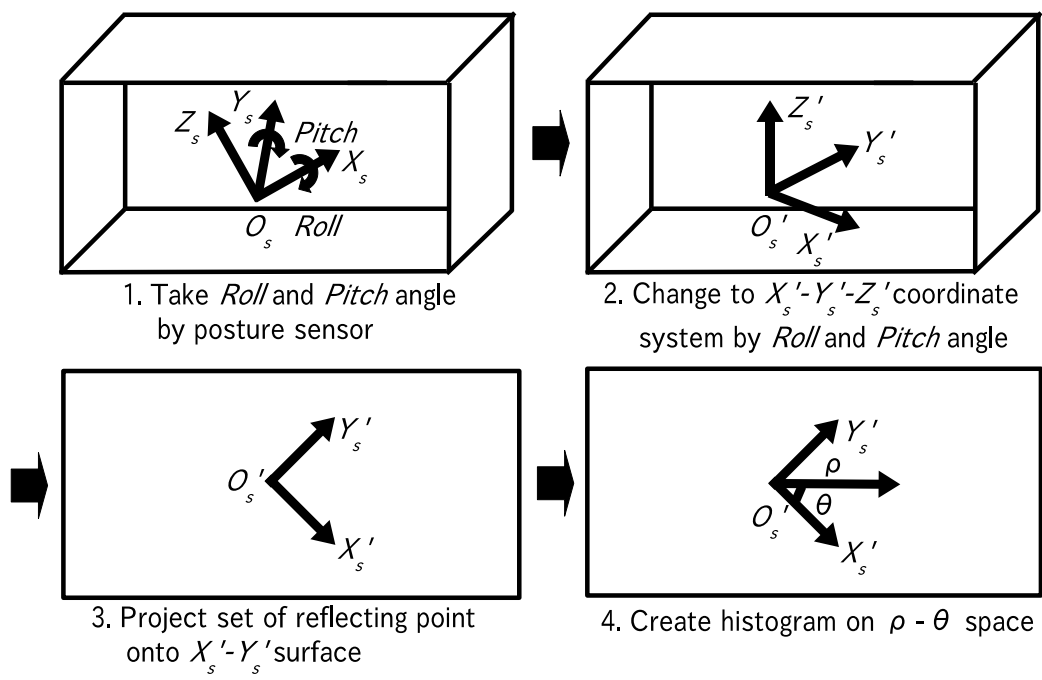
以下ヨー角の計算の具体的な手順を示す (図 3.5) ．

1. 姿勢センサによりシステムの三次元測域センサ部のロールおよびピッチ角を求める．
2. 求めたロールおよびピッチ角により，三次元測域センサ部の走査によって得られた三次元空間の走査 1 回分の X_s - Y_s - Z_s 座標系で表された各々の反射点を，床の面が X_s - Y_s 平面と平行になる X'_s - Y'_s - Z'_s 座標系に座標変換する．
3. 座標変換された反射点群を X'_s - Y'_s 平面に二次元的に投影する．
4. 投影された X'_s - Y'_s 座標系の反射点の各点 (X'_s, Y'_s) に対して Hough 変換により直線成分を求める．すなわち各 θ について，

$$\rho = X'_s \cos \theta + Y'_s \sin \theta \quad (3.1)$$

を計算して，その各点を ρ - 空間上により投票することで θ - 空間上のヒストグラムを作る．

5. ヒストグラムにおいて度数 ρ が最も大きいところの θ の値を記録する．
6. 5. で求めた面の上の反射点データを反射点群のデータから取り除き，再び 4. を繰り返す．
7. 二つ以上のほぼ同じ値の θ が求まるまで，上記の 4.，5. および 6. を繰り返す．
8. 二つ以上のほぼ同じ値の θ が求まる場合，その時の反射点群が主な壁の面を示すので，その θ の値を求める．この θ の値から，壁の面と壁の面は 90 ° 直角に交わるとの性質を利用して，システムの三次元測域センサ部の左方向の壁の面とのなす角を計算して，これをシステムの姿勢のヨー角とする．



☒ 3.5: Process in calculation of yaw angle of system in indoor environment

3.6 移動量の推定

システムは少しずつ移動するとして、毎回の移動における並進移動量は小さいものとする。そのために、毎回求めた壁、柱および天井の面までの距離について、前回と同じ壁、柱および天井の面までの距離との差で移動量を計算する。方位については、移動毎にほぼ同じか約 90 °回転するものとし、並進移動と回転は同時には行わない。

屋内環境を、ホール、階段および廊下の三種類の環境に分けることで、各々の移動量の計算方法を考案した。まず、システムが三種類の環境のうち、どこにあるかによって各々の環境ための移動量の計算方法を適用する。以下、3.6.1 節でホール環境における移動量の計算、3.6.2 節で階段環境における移動量の計算および 3.6.3 節で廊下環境における移動量の計算について、その詳細を説明する。

3.6.1 ホール環境における移動量の計算

継続して計測し，前回の面までの距離と対比して，今回の同じ面までの距離との差をシステムの動きとして求める．前回と今回の一回分の差だけを求め，数回分のデータを用いない．

対象とする環境におけるホールでは，柱の面，柱の側面および壁の面が複数存在する．天井および床は原則として一枚の面から構成されている．そのために移動量は，センサの正面および側面方向は検出した複数の柱の面，柱の側面および壁の面から，高さ方向は一枚の天井の面から推定する．

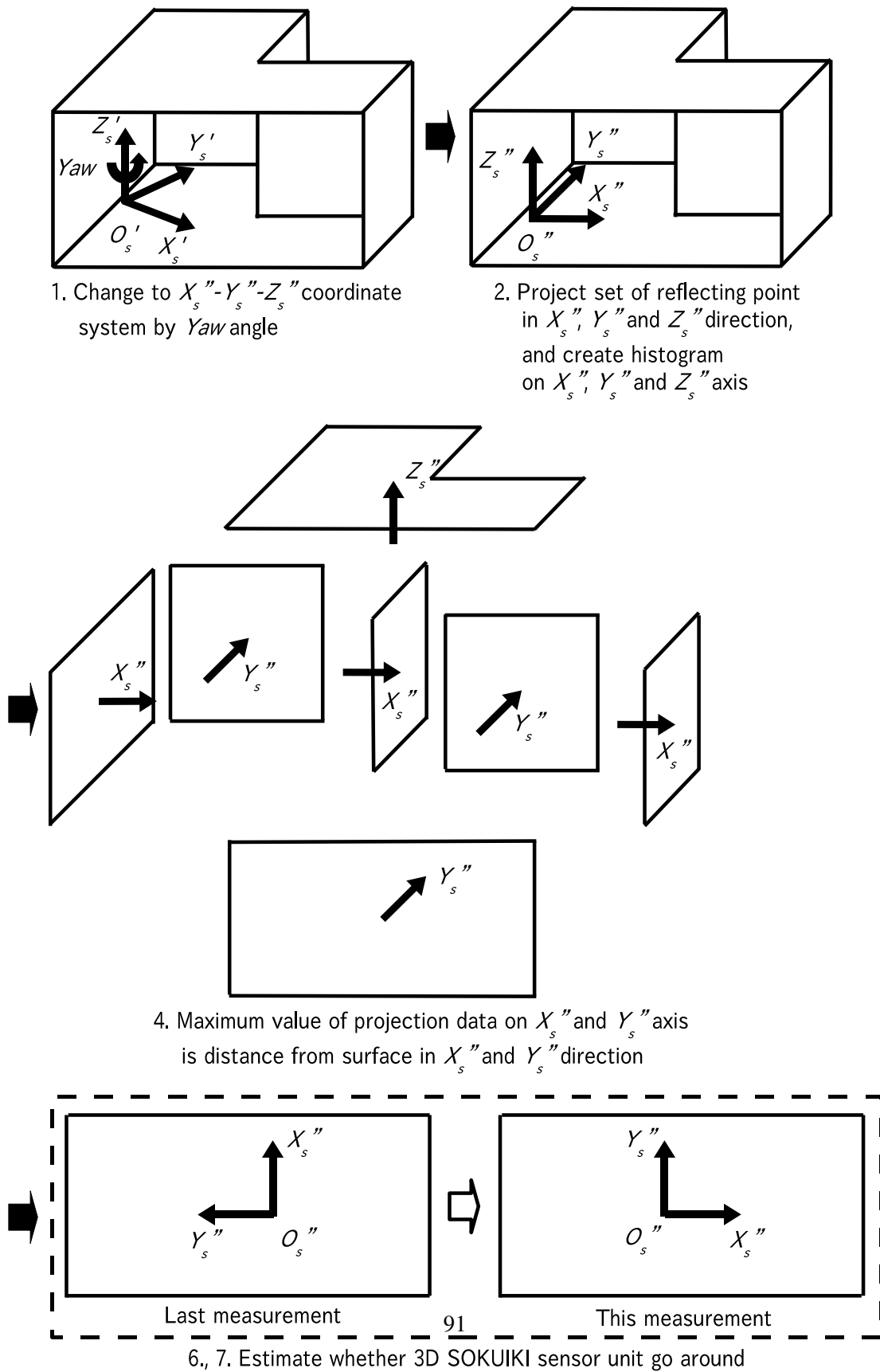
ホール環境における移動量の計算の具体的な手順を以下に示す (図 3.6) ．

1. まず三次元測域センサの全ての反射点を，床面を X'_s - Y'_s 平面とし，センサの左方向の壁の面が X_s'' - Z_s'' 平面に平行となる， X_s'' - Y_s'' - Z_s'' 座標系で表す．
2. 座標変換された反射点の集合を X_s'' ， Y_s'' および Z_s'' の各方向にそれぞれ二次元的に投影して，各軸上のヒストグラムを作る．
3. その X_s'' ， Y_s'' および Z_s'' 軸上のヒストグラムの中で，その最大値か最も大きな方向を求めて，対応する面を記録する．
4. X_s'' および Y_s'' 軸上の投影データの最大値を与える， X_s'' の値および正と負の Y_s'' の値を，各々センサから X_s'' および Y_s'' の両側の面までの距離とする．
5. 前回の測定点において最大値を与えた正の X_s'' の値と比べて，今回の測定点における正の X_s'' の値が大きく，負の Y_s'' の値がほぼ同じ場合，システムの三次元測域センサ部が左回りに進行方向を変えたと判定して，上記で求めたヨー角に 90° を加えて，その値を新たにヨー角とする．また前回の測定点における正の X_s'' の値と比べて，今回の測定点における正の X_s'' の値が大きく，正の Y_s'' の値がほぼ同じ場合，システムの三次元測域センサ部が右回りに進行方向を変えたと判定して，上記で求めたヨー角に -90° を加えて，その値を新たにヨー角とする．
6. 5. の条件が成立しない時はシステムの三次元測域センサ部の向きは変化していないと判断して，正の X_s'' および Y_s'' の値について，前回と今回の測定点における値の差をこの間の移動量とする．

システムの三次元測域センサ部が右回りに進行方向を変えた場合，前回の測定点においてヒストグラムの最大値を与えた負の Y_s'' の値と今回の測定点における正の X_s'' の値との差を X_s'' 方向の移動量として，前回の測定点における正の X_s'' の値と今回の測定点における正の Y_s'' の値との差を Y_s'' 方向の移動量とする．

システムの三次元測域センサ部が左回りに進行方向を変えた場合，前回の測定点における正の Y_s'' の値と今回の測定点における正の X_s'' の値との差を X_s'' 方向の移動量として，前回の測定点における正の X_s'' の値と今回の測定点における負の Y_s'' の値との差を Y_s'' 方向の移動量とする．

7. Z_s'' 軸上の投影データがピーク値となる Z_s'' の値を，前回の測定時からくる Z_s'' 方向に，今回の測定による天井の面を対応させて，それらの間の差を求め， Z_s'' 方向の移動量とする．



☒ 3.6: Process in calculation of motion distance in hall environment

3.6.2 階段環境における移動量の計算

継続して計測し，前回の面までの距離と対比して，今回の同じ面までの距離との差をシステムの動きとして求める．前回と今回の一回分の差だけを求め，数回分のデータを用いない．

階段では，多くの部分で四枚の壁の面により囲まれている．また天井，床および階段の面は，階段環境の高さ方向に複数存在する．そのために階段における移動量は，センサの高さ方向を検出した複数の天井の面から推定する．

次に階段環境における移動量の計算の具体的な手順を以下に示す (図 3.7) ．

1. 床面を X'_s - Y'_s 平面とする X'_s - Y'_s - Z'_s 座標系で表した反射点の集合について，その各々の反射点を計算したヨー角によりシステムの三次元測域センサ部における左方向の壁の面を X_s'' - Z_s'' 平面に平行となるよう座標変換する．
2. 座標変換された反射点の集合を X_s'' ， Y_s'' および Z_s'' の各方向にそれぞれ二次元的に投影して，各軸上のヒストグラムを作る．
3. その X_s'' ， Y_s'' および Z_s'' 軸上のヒストグラムの中で，その最大値か最も大きな方向を求めて，対応する面を記録する．
4. X_s'' および Y_s'' 軸上の投影データの最大値を与える，正と負の X_s'' の値および正の Y_s'' の値を，各々 X_s'' の両側の面および Y_s'' の正方向の面からの距離とする．
5. 前回の測定点における正の X_s'' の値と比べて，今回の測定点における正の X_s'' の値が大きく，正の Y_s'' の値がほぼ同じ場合，システムの三次元測域センサ部が進行方向を変えたと判定して，上記で求めたヨー角に -90° を加えて，その値を新たにヨー角とする．
6. 5. の条件が成立しない時はシステムの三次元測域センサ部の向きは変化していないと判断して，負の X_s'' の値および正の Y_s'' の値について，前回と今回の測定点における値の差をこの間の移動量とする．

システムの三次元測域センサ部が進行方向を変えた場合，前回の測定点における正の Y_s'' の値と今回の測定点における負の X_s'' の値との差を X_s'' 方向の移動量として，前回の測定点における正の X_s'' の値と今回の測定点における正の Y_s'' の値との差を Y_s'' 方向の移動量とする．

7. Z_s'' 軸上の投影データがピーク値となる Z_s'' の値を小さい方から並べ，前回の測定時からくる Z_s'' 方向に階段を上がっているという仮定のもとに，今回の測定による天井の面を対応させて，それらの間の差を求め， Z_s'' 方向の移動量とする．

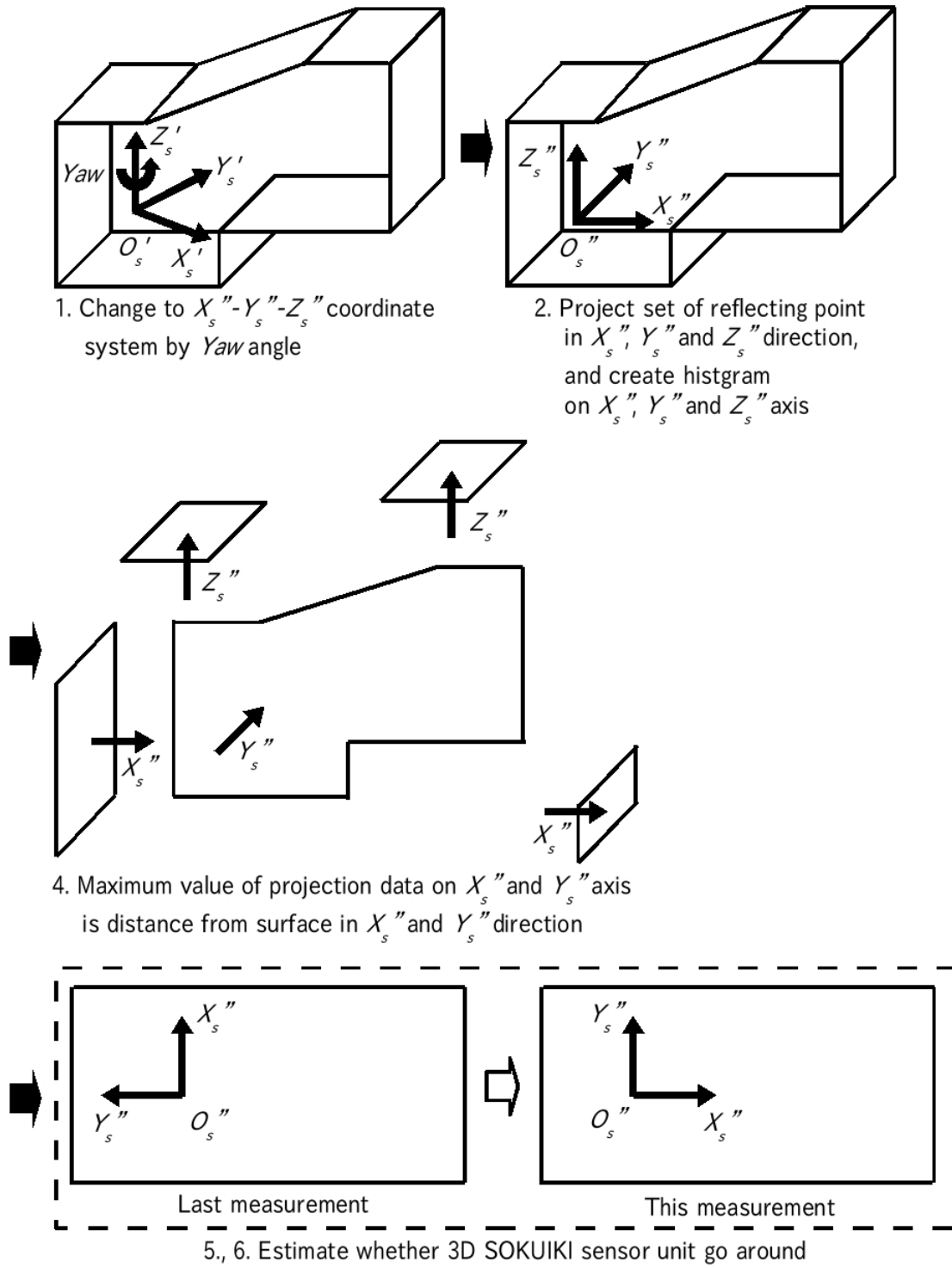


図 3.7: Process in calculation of motion distance in stairs environment

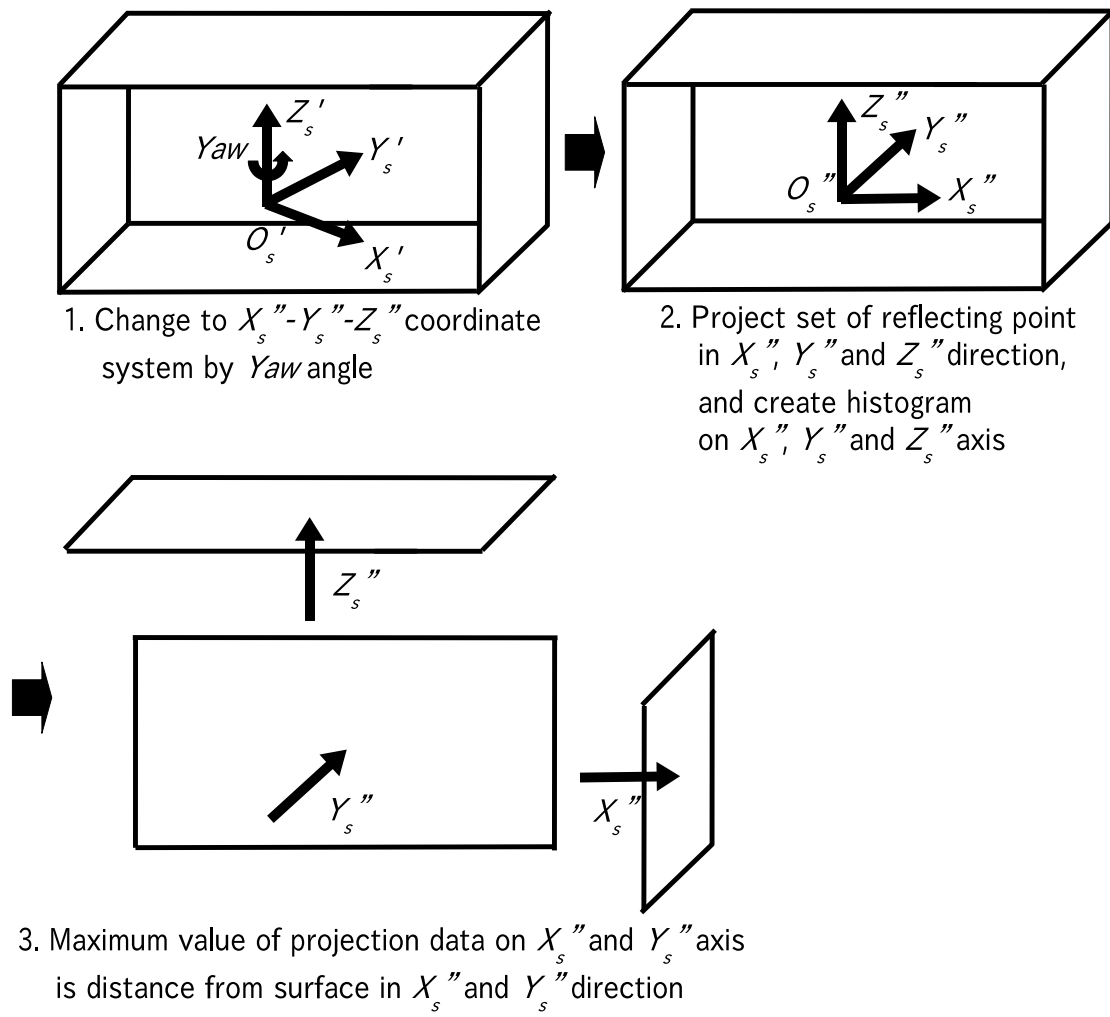
3.6.3 廊下環境における移動量の計算

継続して計測し，前回の面までの距離と対比して，今回の同じ面までの距離との差をシステムの動きとして求める．前回と今回の一回分の差だけを求め，数回分のデータを用いない．

廊下では，壁は原則として一枚の面上に一定間隔で柱が凸状な形を作っている．ここでは柱は壁の面に平行な面と，壁の面と柱の面にそれぞれ 90° 直角に交わる側面から構成される．天井および床は原則として一枚の面から構成されている．そのために廊下における移動量は，センサの正面方向は検出した複数の柱の側面から，側面方向は一枚の壁の面から，高さ方向は一枚の天井の面から推定する．

次に廊下環境における移動量の計算の具体的な手順を以下に示す (図 3.8) ．

1. X'_s - Y'_s - Z'_s 座標系で表した反射点の集合について，その各々の反射点を計算したヨー角により座標変換する．
2. 座標変換された反射点の集合を X_s'' ， Y_s'' および Z_s'' 方向の各面へそれぞれ二次元的に投影して，それぞれのヒストグラムを作る．
3. その X_s'' ， Y_s'' および Z_s'' 軸上のヒストグラムの全体の中の最大値が最も反射点を多く含む面を示す．
4. Y_s'' および Z_s'' 軸上の投影データの最大値を与える正の Y_s'' および Z_s'' の値を各々 Y_s'' および Z_s'' 方向の面からの距離として， Y_s'' および Z_s'' 方向の前回の測定時の値との差をこの間の移動量とする．
5. X_s'' 軸上の投影データがピーク値となる X_s'' の値を小さい方から並べ，前回の測定時からくる X_s'' 方向に進んでいるという仮定のもとに，今回の測定による柱の側面を対応させて，それらの間の差を求め， X_s'' 方向の移動量とする．



☒ 3.8: Processe in calculation of motion distance in gallery environment

3.6.4 環境の変化の判定と移動量計算アルゴリズムの切り替え

システムは測距データを取得した後に、システム自身が今どここの環境にいるかを認識して環境の種類を判定し、判定した環境における移動量の計算方法を適用して移動量を求める。また、同時に前回と今回の測定データから環境の変化を比べて、異なる環境へ移動した場合はその環境の移動量の計算方法を適応して移動量を求める。

対象とする屋内空間はホール、階段および廊下により構成され、ホールは階段と廊下につながり、廊下から階段および階段から廊下へ移動するときには必ずホールを通る。ホールの壁から壁の幅は、階段や廊下のそれと比較して広くなる。また天井の高さは、ホールでは階段より低く、廊下ではほぼ同じである。そのために、屋内環境を構成するホール、階段および廊下の間の移動について、各環境の間の特徴の変化により移動の判定を行い、廊下、階段およびホールにおける移動量の計算方法を切り替える。

ホールから階段への移動では、今回の測定点における正と負の Y_s の値の差分が今回の測定点における正と負の Y_s の値の差分より小さく、かつ今回の測定点における Z_s の値が前回の測定点における Z_s の値より大きい場合、ホールから階段へ移動したと判定して、移動量の推定方法を切り替える。逆に階段からホールへの移動も同様の考えに基づく。

ホールから廊下への移動では、今回の測定点における正と負の Y_s の値の差分が今回の測定点における正と負の Y_s の値の差分より小さく、かつ今回の測定点における Z_s の値が前回の測定点における Z_s の値がほぼ変わらない場合、ホールから廊下へ移動したと判定して、移動量の推定方法を切り替える。逆に廊下からホールへの移動も同様の考えに基づく。

3.6.5 移動軌跡の計算と三次元地図の生成

生成する地図とシステムのセンサ部の推定位置は、システムを初めに働かせたときのシステムの三次元測域センサ部における原点 O_s を中心とする X_s - Y_s - Z_s 座標系を世界座標系として示す。推定位置は、上記で求めた X_s 、 Y_s および Z_s 方向の移動量を前回の測定点における各方向の推定位置に加えて、システムを初めに働かせたときのセンサ部の O_s を原点とした現在位置の世界座標系上で示す。毎回の測定で得られた反射点データをシステムの三次元測域センサ部を中心とする X_s - Y_s - Z_s 座標系で表したものを毎回の推定位置だけ平行移動および回転させた点の位置 (X, Y, Z) データ群をポイントクラウド表現の三次元地図として蓄積・記録する。

3.7 実験による有効性の確認

試作したハードウェアに，上記で説明したアルゴリズムを実装して，その有効性を確認する．以下，アルゴリズムのためのソフトウェアの実装について述べる．

本システムのソフトウェアは、三次元測域センサ部を制御する揺動コントローラ内の処理プロセス、およびメインコントローラ内の処理プロセスにより構成した。メインコントローラ内の処理プロセスは、二次元測域センサ部から測距データの取得、揺動コントローラから揺動機構の回転角度データの取得、姿勢センサ部から姿勢データとしてロールおよびピッチ角の取得、ヨー角の計算、反射点を X_s - Y_s - Z_s 座標系で表すための計算、移動量の計算および三次元地図の生成である。ヨー角および移動量は、上記に述べたアルゴリズムにより計算され、このアルゴリズムを実装した。データの取得から移動軌跡の計算および三次元地図の生成は、実時間で処理される。

システム内のヨー角の計算では、用いた反射点数は1,000、 の範囲は-10,000mm から 10,000mm、分解能は1mm とし、 の分解能は0.1 °とした。移動量の計算において用いた反射点数は5,500、面を検出する範囲は-10,000mm から 10,000mm とし、分解能は1mm とした。

3.8 実験と結果

構築したシステムを用いて、実際の屋内環境においてシステムを働かせることで、移動量の推定および三次元地図を生成するアルゴリズムの有効性を確認した。以下、3.8.1 節で実験の内容、3.8.2 節で実験結果および 3.8.3 節で実験結果に対する考察について述べる。

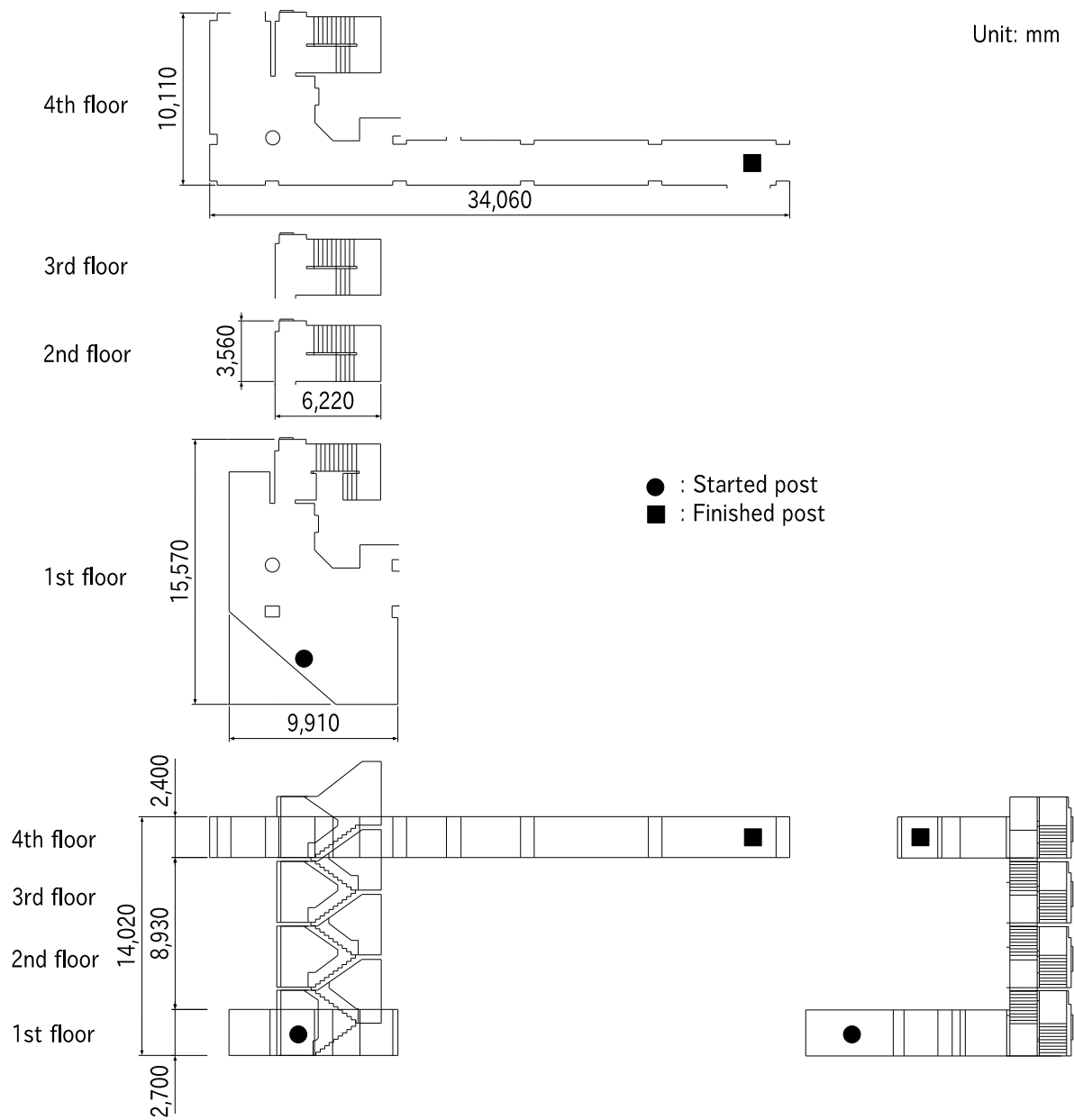
3.8.1 実験の内容

図 3.1 および図 3.9 に示す筑波大学第三エリア L 棟の屋内環境において、実際に構築したシステムを働かせて移動量の推定および三次元地図を生成する実験を行った。図 3.3 に実際の実験の様子を示す。屋内環境である L 棟 1 階の入口付近から 4 階の知能ロボット研究室の前までの範囲で行い、オペレータがシステムを持ち運んでおおよそ 2m 間隔でそれぞれの場所で環境の走査データを取得して、歩いて移動した。また、各点において移動量を推定して、その結果を用いてセンサ座標系上にレーザ反射点データを記録した。

3.8.2 実験結果

図 3.11 から図 3.17 に実験で生成された三次元地図である反射点の集合を示す。十字は各回の測定を行った位置の推定値である。図 3.11 は計測したすべての反射点を三次元表示したものである。三次元地図における空間の幾何学的形状を確認するために、図 3.12 に反射点群の 1 階部分を平面上に投影表示したもの、図 3.13 に反射点群の 2 階部分を平面上に投影表示したもの、図 3.14 に反射点群の 3 階部分を平面上に投影表示したもの、図 3.15 に反射点群の 4 階部分を平面上に投影表示したもの、図 3.16 に反射点群を $X-Z$ 面へ投影表示したもの、図 3.17 に反射点群を $Y-Z$ 面へ投影表示したものを示す。空間形状を見やすくするために、図 3.12 から図 3.15 では天井および床の面を、図 3.16 および図 3.17 では壁の面を非表示としている。

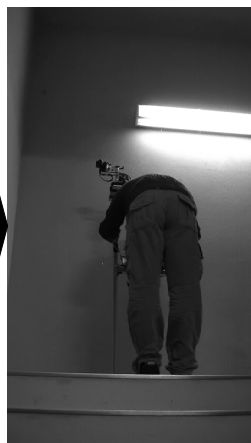
L 棟 1 階の入口付近から 4 階の知能ロボット研究室の前まで、48 地点において移動量を推定して三次元地図を生成した。



☒ 3.9: Real layout of indoor environment



Hall at 1st floor



Stairs



Hall at 4th floor



Gallery

☒ 3.10: Aspect of experiment

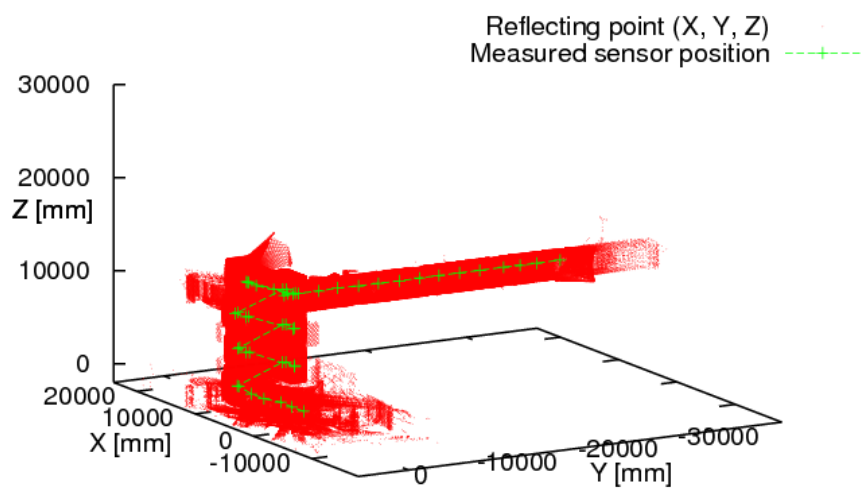
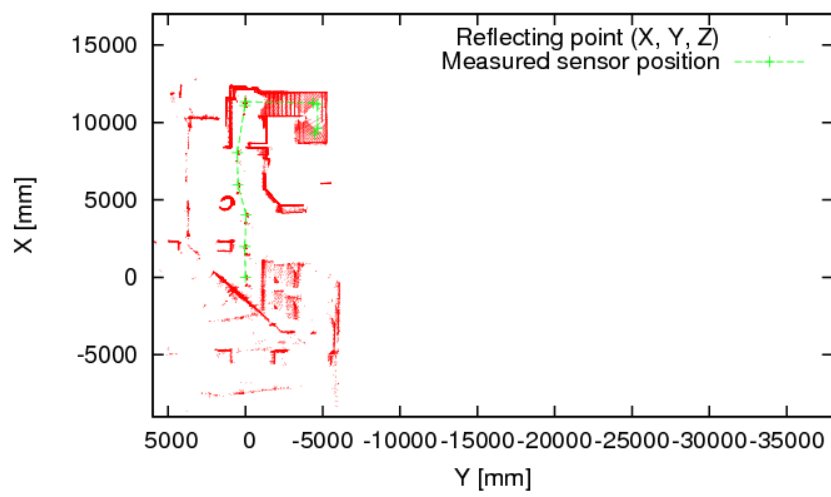


图 3.11: X - Y - Z plot of measured sensor position and reflecting point



3.12: X - Y plot of measured sensor position and reflecting point in 1st floor

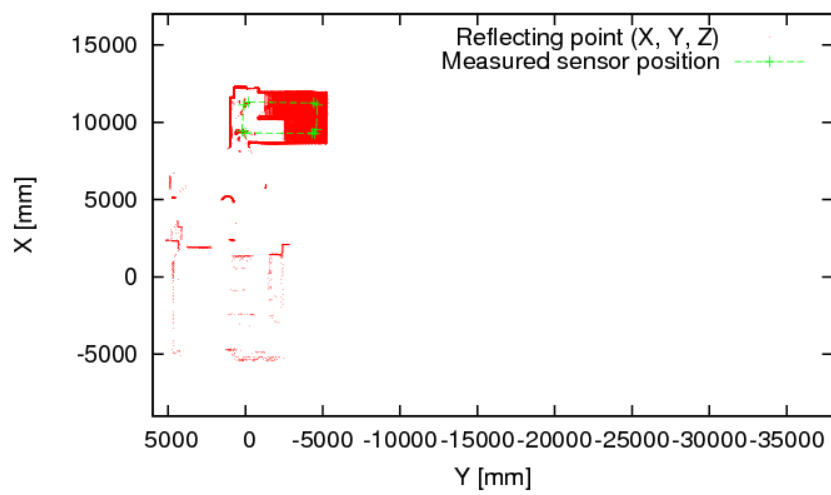
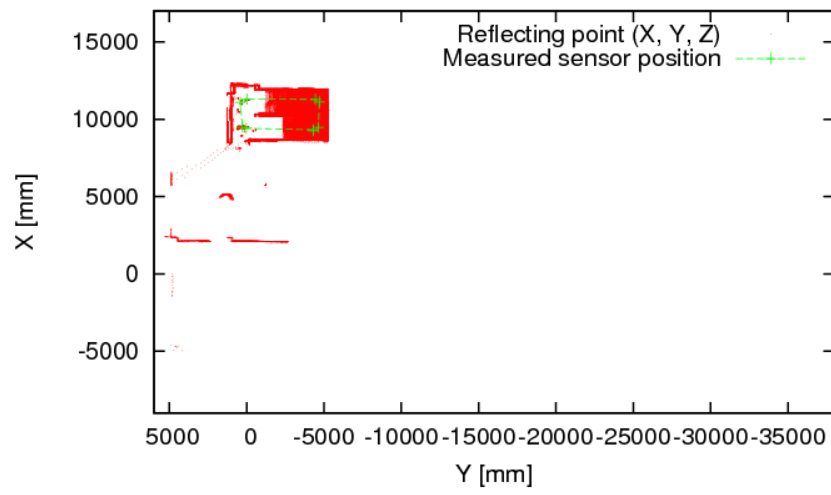
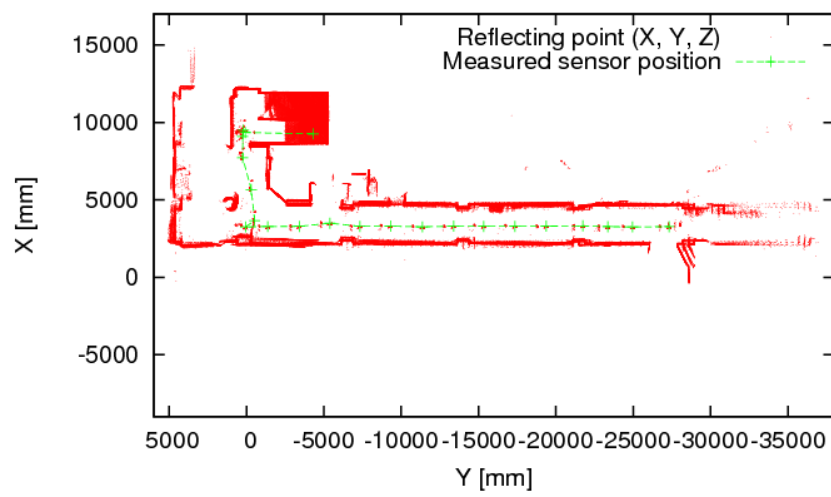


图 3.13: X - Y plot of measured sensor position and reflecting point in 2nd floor



3.14: X - Y plot of measured sensor position and reflecting point in 3rd floor



3.15: X - Y plot of measured sensor position and reflecting point in 4th floor

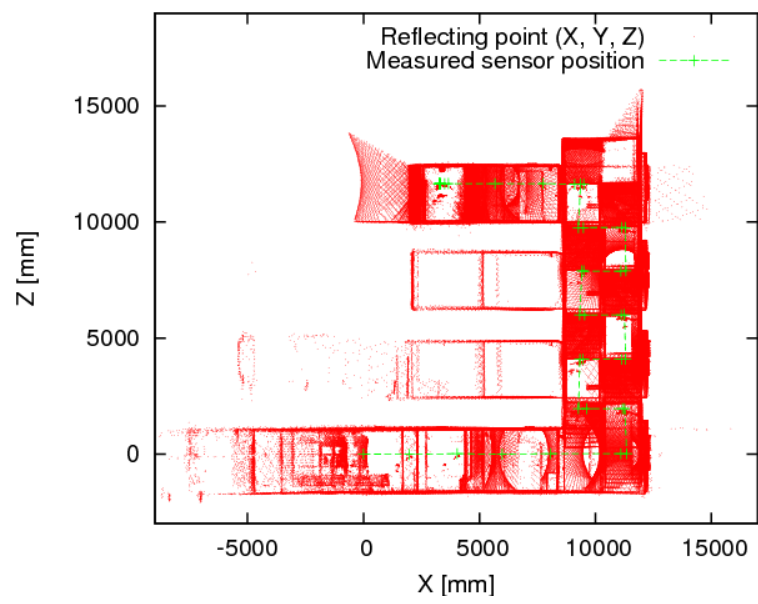
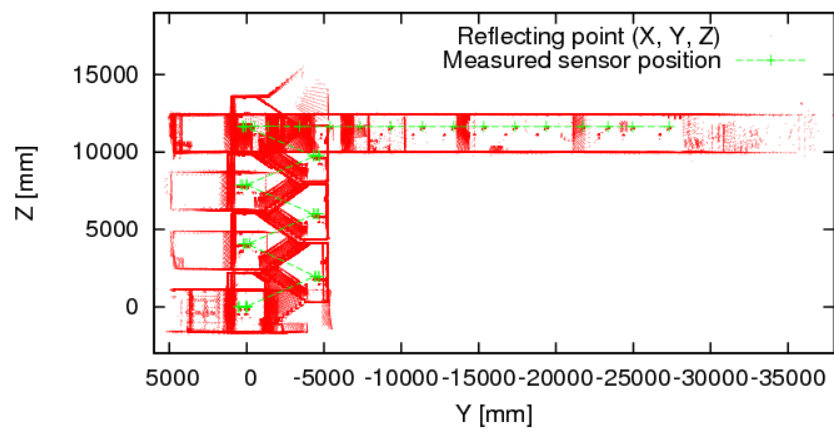


Fig. 3.16: X-Z plot of measured sensor position and reflecting point



☒ 3.17: Y-Z plot of measured sensor position and reflecting point

3.8.3 実験結果に対する考察

図 3.12 から図 3.17 について，図 3.9 に示す実際の空間形状と比較して，ほぼ形状通りの反射点データが得られており，本システムによってほぼ正確な三次元地図を生成できていることが分かる．このことはシステムの姿勢と移動軌跡がほぼ正しく推定されていることを意味している．また生成された地図は，屋内環境の壁，柱，階段，天井および床などの空間形状を確認できる精度である．図 3.9 に示すような広い空間領域ではあるが，図 3.12 から図 3.17 に示す精度の地図が生成できる．

なお毎回のヨー角の計算時間は最大 0.83 秒，移動量の計算時間は最大 0.24 秒および三次元地図の生成時間は最大 0.05 秒であり，三次元空間の走査時間である 1.0 秒と合わせて，各地点においてはシステムを働かせてから最大 2.1 秒以内で移動量を求めることができた．L 棟 1 階の入口付近から 4 階の知能ロボット研究室の前まで，移動時間を含めた所要時間は，約 6 分であった．人の手で空間の三次元形状を計測して，その三次元地図を作ることと比べて，本システムを用いることで図 3.9 に示す広い空間の地図を短時間で生成できる．

3.9 第3章の結論

私は、生活空間の設計者が、学校やオフィスビルにおける屋内内部の広い範囲において三次元形状地図を容易に取得して、その地図を確認できることを目的として、屋内形状の特徴を用いた人が持ち運び移動できる三次元移動量推定・環境地図生成システムを開発した。

システムの構成方法を考察して、また三次元移動量推定のためのアルゴリズムを考案した。このシステムは、私が開発した三次元測域センサを用いることで、屋内空間において三次元形状情報を取得し、それより自分自身の移動軌跡を推定し、さらにこの移動軌跡を用いて三次元地図を生成するものである。

構築したアルゴリズムでは、屋内環境の直角平行な柱や壁、天井を検出してその面との距離を用いてセンサの移動量を推定した。廊下、階段およびホールはそれぞれ直角平行な壁や天井の面で構成されるが、それぞれの環境における特徴は異なるので、廊下、階段およびホール環境を通した移動量の推定では、これらの環境の異なる特徴を考慮して各環境において異なる計算アルゴリズムの条件を用いて、さらにこれらの環境の間を移動するときに、その移動を判定する条件を用いて各計算アルゴリズムを切り替えた。

この方式とアルゴリズムの有効性を確認するために、実際にシステムを試作し、ソフトウェアを開発・実装して筑波大学構内の屋内環境で実験を行い、移動軌跡の推定とそれに基づく地図作成を行った。その結果、実際の空間における三次元形状地図との比較から、正確な三次元移動軌跡の推定および三次元地図が得られることが分かり、システムの構成方法とアルゴリズムの有効性を確認した。

また、このアルゴリズムが適応できる場所は、屋内空間の柱や壁、天井の直角平行な面の三次元形状情報が取得できる場合に限られるが、多くの屋内環境は直角平行で床面や天井も十分平らなので、このアルゴリズムが適用できると考えられる。そのために、本手法の適応可能範囲は広いと考えている。

第4章 あとがき

4.1 本研究の成果

4.1.1 回転式揺動機構と SCIP-3D mini コマンドシステムを用いた三次元測域センサモジュール

私は、生活空間の設計者が人の動きや生活空間の幾何学的形状を把握するために三次元形状情報を容易に取得する、回転式揺動機構と SCIP-3D mini コマンドシステムを用いた三次元測域センサモジュールを実現した。三次元測域センサを一つの機能要素としてまとめるモジュール化によって、センサの開発者だけではなく、センサの詳細な構成を知らない生活空間の設計者などが容易に三次元形状情報を取得できる。

三次元測域センサモジュールは、森らが考案した二次元測域センサを回転式揺動機構を用いて走査する方式と、油田らが策定した SCIP-3D コマンドインターフェイスに準拠して、私が設計した SCIP-3D mini コマンドシステムをインターフェイスとして用いて構成した。センサモジュールのハードウェアは、二次元測域センサ、回転式揺動機構、揺動機構を制御する揺動コントローラおよびメインコントローラにより構成した。ソフトウェアとして、揺動機構の制御系を揺動コントローラに、二次元測域センサと回転式揺動機構を用いた走査から三次元反射点位置を計算するプロセスと SCIP-3D mini のコマンドを処理するプロセスをメインコントローラに実装した。実現したセンサモジュールの仕様は以下の通りである。

- センサモジュールの視野は、水平方向に 270 °、垂直方向は可変可能な 30-120 °と三次元空間において帯状の視野を持つ。
- 対象物においてほぼ均一に分布したレーザ反射点の集合を取得する。
- 最速 0.2 秒で、高速に三次元空間の反射点を取得できる。
- 反射点の分解能として、測距精度は $\pm 5\text{cm}$ である。
- レーザ光線による測距を行うために、環境中の照明条件に左右されにくい。
- センサモジュールの大きさは、比較的小型である。
- SCIP-3D mini コマンドシステムにより、センサモジュールのユーザが容易に三次元反射点の位置を取得できる。

実現した三次元測域センサモジュールを用いて、屋内および屋外環境の計測結果を示した。この結果より目標とするセンサモジュールの仕様において、実際に人が生活する屋内および屋外環境の生活空間の三次元形状、および歩いて移動する人の三次元形状を得られることを確認した。

三次元測域センサモジュールは、そのモジュール化によってセンサの開発者だけではなく、センサの詳細な構成を知らないユーザが容易に三次元形状情報を取得できることが特徴である。既にこのセンサモジュールは、開発者以外の筑波大学知能ロボット研究室内のユーザによって、人の動きの検出や移動ロボットを用いた屋内の三次元地図生成など、それぞれの研究のために使われている。

4.1.2 屋内形状の特徴を用いた可搬型の三次元移動量推定・環境地図生成システム

生活空間の設計者が、学校やオフィスビルにおける屋内内部の広い範囲において三次元形状地図を容易に取得して、その地図を確認できることを目指して、私は屋内形状の特徴を用いた人が持ち運び移動できる三次元移動量推定・環境地図生成システムを開発した。これを実現するために、システムの構成方法を考察して、システムの三次元移動量推定のためのアルゴリズムを考案した。このシステムは、私が実現した回転式揺動機構を用いた三次元測域センサを用いることで、広い範囲の屋内空間における三次元形状情報を取得し、取得した情報によりセンサ自身の移動軌跡を推定し、さらにこの移動軌跡を用いて三次元地図を生成するものである。

三次元移動量推定アルゴリズムを構築するために、まず対象とする屋内環境を分析して、その特徴をまとめた。その結果、屋内環境の直角平行な柱や壁、天井を検出してその面との距離を用いてセンサの移動量を推定することとした。ホール、階段および廊下はそれぞれ直角平行な壁や天井の面で構成されるが、それぞれの環境における構成の特徴が異なる。そのために、ホール、階段および廊下環境を通した移動量の推定では、これらの環境の異なる特徴を考慮して各環境において異なる計算方法の条件を用いて、さらにこれらの環境の間を移動するときに、その移動を判定する条件を用いて各計算方法を切り替えた。

この方式とアルゴリズムの有効性を確認するために、実際にシステムを試作し、ソフトウェアを開発してシステムに実装した。試作したシステムを用いて、筑波大学構内の屋内環境で実験を行い、移動軌跡の推定とそれに基づく地図作成を行った。その結果、実際の空間における三次元形状地図との比較から、正確な三次元移動軌跡の推定および三次元地図が得られることが分かった。よってシステムの構成方法とアルゴリズムの有効性を確認した。

また、このアルゴリズムが適応できる場所は、屋内空間の柱や壁、天井の直角平行な面の三次元形状情報が取得できる場合に限られるが、多くの屋内環境は直角平行で床や天井の面も十分平らなので、このアルゴリズムが適用できると考えられる。そのために、本手法の適応可能範囲は広いと考えている。

4.2 今後の展望

三次元測域センサモジュールは、その開発者以外の多くの人々が容易に様々な目的に利用するために開発した。その一例として、開発した三次元測域センサモジュールは、生活空間の設計者が屋内および屋外環境中に設置することで、空間の三次元形状情報を取得することに役立てたい。設計者が取得した情報を用いることで、生活空間の構成を把握して空間構成の改築や新たな設計の判断材料として役立てることが期待される。

可搬型の三次元移動量推定・環境地図生成システムは、そのシステムの構成方法と移動軌跡を推定する計算方法を考慮して、試作したシステムを用いることでその有効性を確かめた。実際に実用的なシステムに発展させることが今後の方向である。そのシステムを生活空間の設計者が用いることで、学校やオフィスビルなどのさまざまな広範囲な屋内環境において三次元地図を生成して、生成した三次元地図から健全な生活空間の構成方法を検討することに役立ててもらいたい。

謝辞

本研究は、工学博士 油田信一 筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻教授の指導のもとに行われたものである。同教授には、本研究を進めるにあたり、研究内容の議論、研究結果の発表および論文の執筆をご指導いただいた。

また、工学博士 坪内孝司 筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻教授、工学博士 大場光太郎 筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻連携大学院教授、博士(工学) 長谷川泰久 筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻准教授、博士(工学) 大矢晃久 筑波大学大学院システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻准教授および博士(工学) 梅田和昇 中央大学理工学部精密機械工学科教授には、本論文をまとめる上で多くの助言をいただいた。

教育学修士 五味義夫 山梨英和大学大学院人間文化研究科臨床心理学専攻教授には、私が山梨大学在学時よりお世話になった。同教授には、私が教育研究の分野に進む切っ掛けと後押しをしていただいた。今後も、同教授を目標に良き教育研究者になれるように精進していきたい。

上述の皆様はこの場を借りて深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 山本和彦，棚橋英樹，桑島茂純，丹羽義典，実環境センシングのための全方向ステレオシステム (SOS)，電気学会論文誌. C, 121 巻, No.5, (2001), pp.876-881.
- [2] MESA Imaging AG ed., *SR4000 Data Sheet*, (2009), pp.1-6, MESA Imaging AG.
- [3] 松下電工株式会社編，距離画像センサ EKL3101 商品仕様書, (2005), pp.1-2, 松下電工株式会社.
- [4] 日本信号株式会社編，3次元距離画像センサ FX-6, (2008), pp.1-2, 日本信号株式会社.
- [5] Kawata, H., Santosh, W., Mori, T., Ohya, A., Yuta, S., Development of Ultra-small Lightweight Optical Range Sensor System, *Proceedings of 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (2005-8), pp.3277-3282.
- [6] 森利宏，日野政典，上谷敏寛，油田信一，TOF の原理を用いた AM 方式および、パルス方式の測域センサの開発，第 25 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (2007-9), p.2A13.
- [7] Hokuyo Automatic Co., Ltd. ed., *URG Series Communication Protocol Specification SCIP-Version2.0*, (2006), pp.2-6, Hokuyo Automatic Co., Ltd..
- [8] Matsumoto M., Yuta S., Consideration on Scanning Line Density in 3D SOKUIKI Sensor with Roundly Swinging Mechanism, *Proceedings of The First International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors*, (2010-3), pp.184-187.
- [9] 大野和則，桜田健，竹内栄二郎，小山順二，田所諭，高速で密な形状計測を行う小型 3次元スキャナーの開発，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009 講演論文集，No.09-4，(2009-5), p.1A1-E04.
- [10] 北陽電機. 三次元測距装置. 特開 2008-134163. 2008-06-12.
- [11] 油田信一，梅田和昇，飯島純一，藤瀬弘樹，桃井康行，塚田敏彦，西沢俊広，村井亮介，吉見卓，林浩一郎，嶋地直広，吉田智章，永谷圭司，大野和則，前山祥一，大矢晃久，川田浩彦，原祥亮，使い易い三次元測域センサのインタフェースを目指して コマンドシステム策定のための研究会活動，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2007 講演論文集，No.07-2，(2007-5), p.1P1-L01.

- [12] Hara Y., Kawata H., Ohya A., Yuta S., Map Building for Mobile Robots using a SOKUIKI Sensor -Robust Scan Matching using Laser Reflectance Intensity-, *Proceedings of the SICE-ICASE International Joint Conference 2006*, (2006), p.SE14-4.
- [13] Hara Y., Kawata H., Ohya A., Yuta S., Mobile Robot Localization and Mapping by Scan Matching using Laser Reflection Intensity of the SOKUIKI Sensor, *Proceedings of the 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, (2006), pp.3018-3023.
- [14] Takemura K., Araki A., Ido J., Matsumoto Y., Takamatsu J., Ogasawara T., Generating Individual Maps from Universal Map for Heterogeneous Mobile Robots, *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (2010), pp.3460-3465.
- [15] Pitzer B., Kammel S., Duhadway C., Becker J., Automatic Reconstruction of Textured 3D Models, *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (2010), pp.3486-3493.
- [16] コクヨ株式会社. 携帯型の3次元計測機器を発売.
<http://www.kokuyo.co.jp/press/news/20081120-903.html>, (参照 2011-01-05).
- [17] Thrun S., Fox D., Burgard W., A probabilistic approach to concurrent mapping and localization for mobile robots, *Autonomous Robots*, Vol.5, No.3-4, (1998), pp.253-271.
- [18] Paul J. Besl, Neil D. McKay, A Method for Registration of 3-D Shapes, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.14, No.2, (1992), pp.239-256.
- [19] F. Lu, E. Milios, Robot Pose Estimation in Unknown Environments by Matching 2D Range Scans, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol.18, (1997), pp.249-275.
- [20] 阪東茂, 油田信一, 建物内の形状の特徴に基づく移動体の自己姿勢・位置の計測, 第28回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (2010-9), p.1Q3-3.
- [21] 株式会社アットマークテクノ編, Armadillo-500 Development Board ハードウェアマニュアル, (2008), pp.5-6, 株式会社アットマークテクノ.
- [22] Renesas Solutions Corp. ed., *Renesas 32-Bit RISC Microcomputer Hardware Manual SH7125 Group, SH7124 Group*, (2008), pp.1-5, Renesas Technology Corp..
- [23] 八木秀憲, 松本光広, 大矢晃久, 油田信一, 三次元測域センサを用いた人間検出: Hough変換による頭部検出, 第11回 SICE システムインテグレーション部門講演会論文集, 10SY0016, (2010-12), pp.108-111.
- [24] 森田華子, 三次元測域センサを有する移動ロボットによる三次元地図生成 三次元ポイントデータ群からの床面抽出, 平成21年度筑波大学第三学群工学システム学類卒業論文, (2010).

- [25] Crossbow Technology, Inc. ed., *AHRS400*, (2009), p.1, Crossbow Technology, Inc..
- [26] レノボ・ジャパン 株式会社. ThinkPad X61/X61s. http://www-06.ibm.com/jp/pc/enterprise/thinkpad/x-series/x61_lineup.shtml, (参照 2011-01-05).

著者研究業績目録

本論文の内容に関係の深い発表文献

査読付雑誌論文

1. 松本光広, 吉田智章, 森利宏, 油田信一, 回転式揺動機構と SCIP-3D コマンドシステムを用いた三次元測域センサモジュール, 日本機械学会論文集 . C 編 , 75 , 760 , pp.3314-3323 , 2009 .

査読付国際会議論文

1. Mitsuhiro Matsumoto, Shin'ichi Yuta, 3D SOKUIKI Sensor Module by Roundly Swinging Mechanism and SCIP-3D Interface, Proceedings of The 6th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, pp.37-41, 2009.
2. Mitsuhiro Matsumoto, Shin'ichi Yuta, Consideration on Scanning Line Density in 3D SOKUIKI Sensor with Roundly Swinging Mechanism, Proceedings of The First International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors, pp.184-187, 2010.
3. Mitsuhiro Matsumoto, Shin'ichi Yuta, 3D Laser Range Sensor Module with Roundly Swinging Mechanism for Fast and Wide View Range Image, Proceedings of The 2010 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, pp.156-161, 2010.

査読付国内会議論文

1. 松本光広, 油田信一, 三次元測域センサモジュールによる高速・広視野・長距離の距離画像の取得, 第 15 回ロボティクスシンポジウム予稿集, 10SY0003, pp.514-519, 2010 .

査読無し国内会議論文

1. 松本光広, 吉田智章, 小柳栄次, 川田浩彦, 嶋地直広, 大矢晃久, 油田信一, 回転式揺動機構による測域センサの三次元化, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008 講演論文集, 08-4, p.2P1-G17, 2008 .

2. 松本光広, 吉田智章, 油田信一, 回転式揺動機構を用いた三次元測域センサのモジュール化: SCIP-3D インターフェイスの実装, 第 9 回 SICE システムインテグレーション部門講演会論文集, 08SY0015, pp.1247-1248, 2008.
3. 松本光広, 吉田智章, 油田信一, 回転式揺動機構を用いた三次元測域センサモジュール, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009 講演論文集, 09-4, p.1A1-E07, 2009.
4. 松本光広, 吉田智章, 油田信一, 高速に広視野の距離画像を得る回転式揺動機構を用いた三次元測域センサ, 第 15 回画像センシングシンポジウム講演論文集, pp.IS1-08-1-4, 2009.
5. 松本光広, 油田信一, 回転式揺動機構を用いた三次元測域センサモジュールによる受光強度付きスキャンデータの取得, 茨城講演会講演論文集, 090-2, pp.197-198, 2009.
6. 松本光広, 油田信一, 回転式揺動機構を用いた三次元測域センサのためのコマンドシステム“ SCIP-3D mini ”, 第 27 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, p.2I2-06, 2009.
7. 松本光広, 油田信一, 回転式揺動機構を用いた三次元測域センサで取得される走査線の密度の検討, 第 10 回 SICE システムインテグレーション部門講演会論文集, 09SY0013, pp.2I22-2I24, 2009.
8. 松本光広, 油田信一, 高速に広視野の距離および反射強度の画像を得る回転式揺動機構を用いた三次元測域センサ, 第 16 回画像センシングシンポジウム講演論文集, pp.IS1-10-1-6, 2010.
9. 松本光広, 油田信一, 屋内廊下環境で用いる携帯型の移動量推定・環境地図生成システムの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010 講演論文集, 10-4, p.1A2-D24, 2010.
10. 松本光広, 油田信一, 屋内階段環境で用いる携帯型の三次元移動量推定・環境地図生成システムの開発, 第 28 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, p.1Q3-1, 2010.
11. 八木秀憲, 松本光広, 大矢晃久, 油田信一, 三次元測域センサを用いた人間検出: Hough 変換による頭部検出, 第 11 回 SICE システムインテグレーション部門講演会論文集, 10SY0016, pp.108-111, 2010.
12. 松本光広, 油田信一, 屋内環境で用いる携帯型システムのための三次元移動量推定・環境地図生成アルゴリズム, 第 11 回 SICE システムインテグレーション部門講演会論文集, 10SY0016, pp.1644-1647, 2010.

本論文と異なる内容の発表文献

査読付雑誌論文

1. 松本光広, 沢俊行, 西田隆仁, 曲げモーメントを受けるガスケット付き管フランジ締結体の有限要素法応力解析と密封性能評価, 日本機械学会論文集 . A 編, 69, 681, pp.823-831, 2003 .
2. 永田聡, 沢俊行, 尾方尚文, 松本光広, 内圧を受ける渦巻き型ガスケット付き管フランジ締結体の有限要素法応力解析と特性評価, 圧力技術, 41, 6, pp.2-12, 2003 .
3. 永田聡, 松本光広, 沢俊行, 内圧作用下でのガスケット付管フランジ締結体の応力解析と密封性能評価: ボルト初期締付け力のばらつきの影響, 日本機械学会論文集 . A 編, 70, 699, pp.45-52, 2004 .
4. 松本光広, 沢俊行, 曲げモーメントを受ける渦巻き形ガスケット付管フランジ締結体の有限要素法応力解析と密封性能評価: 作動流体が液体の場合, 日本機械学会論文集 . A 編, 71, 704, pp.685-691, 2005 .

査読付国際会議論文

1. Toshiyuki Sawa, Mitsuhiro Matsumoto, FEM Stress Analysis and Sealing Performance in Pipe Flange Connections With Gaskets Subjected to Internal Pressure and External Bending Moment, Proceedings of ASME 2002 Pressure Vessels and Piping Conference, Analysis of Bolted Joints, PVP2002-1086, pp.81-89, 2002.
2. Toshiyuki Sawa, Mitsuhiro Matsumoto, Fumio Ando, FEM Stress Analysis and Sealing Performance in Pipe Flange Connections With Gaskets Subjected to External Bending Moment: Case Where Internal Fluid is Liquid, Proceedings of ASME 2003 Pressure Vessels and Piping Conference, Analysis of Bolted Joints, PVP2003-1877, pp.85-95, 2003.
3. Toshiyuki Sawa, Mitsuhiro Matsumoto, Satoshi Nagata, Effects of Scatter in Bolt Preload of Pipe Flange Connections With Gaskets on Sealing Performance, Proceedings of ASME 2003 Pressure Vessels and Piping Conference, Analysis of Bolted Joints, PVP2003-1875, pp.65-75, 2003.
4. Satoshi Nagata, Mitsuhiro Matsumoto, Toshiyuki Sawa, Bolt Load Changes Due to Internal Pressure in Gasketed Flange Connections, Proceedings of ASME 2003 Pressure Vessels and Piping Conference, Analysis of Bolted Joints, PVP2003-1872, pp.47-52, 2003.
5. Satoshi Nagata, Mitsuhiro Matsumoto, Toshiyuki Sawa, Load Factor Based Calculation for Bolt Load and Gasket Load Changes Due to Internal Pressure, Proceedings of ASME/JSME

2004 Pressure Vessels and Piping Conference, Analysis of Bolted Joints, PVP2004-2626, pp.89-96, 2004.

査読無し国内会議論文

1. 沢俊行, 尾方尚文, 松本光広, 曲げモーメントを受ける管フランジ締結体の FEM 応力解析, 山梨講演会講演論文集, 010-4, pp.105-106, 2001.
2. 沢俊行, 松本光広, 西田隆仁, 内圧及び曲げモーメントを受けるガスケット付き管フランジ締結体の FEM 応力解析と密封性能, 日本機械学会関東支部第 8 期総会講演会講演論文集, 020-1, pp.543-544, 2002.
3. 沢俊行, 松本光広, 曲げモーメントを受けるガスケット付き管フランジ締結体の FEM 応力解析と密封性能, 山梨講演会講演論文集, 020-4, pp.67-68, 2002.
4. 沢俊行, 松本光広, ガスケット付き管フランジ締結体のボルト締付け管理が漏洩に及ぼす影響に関する研究, 山梨講演会講演論文集, 020-4, pp.63-64, 2002.
5. 沢俊行, 松本光広, 曲げモーメントを受けるガスケット付き管フランジ締結体の FEM 応力解析と密封性能: 作動流体が液体の場合, 東海支部第 52 期総会講演会講演論文集, 033-1, pp.261-262, 2003.
6. 永田聡, 沢俊行, 松本光広, 内圧によるフランジガスケット締結体のボルト張力変化, 山梨講演会講演論文集, 030-4, pp.29-30, 2003.
7. 松本光広, 内圧を受けるガスケット付き閉止型フランジ締結体の応力解析と密封性能評価, 関東支部第 16 期総会講演会講演論文集, 100-1, pp.517-520, 2010.
8. 松本光広, 近赤外線を用いた小型の血管位置検出装置の開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010 講演論文集, 10-4, p.2P1-G18, 2010.