慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	三次元スキャナを用いた円柱状物体の形状測定
Sub Title	Shape measurement of the cylindrical objects by 3D scanner
Author	伊東, 恭子(Ito, Kyoko) 狼, 嘉彰(Okami, Yoshiaki)
Publisher	慶應義塾大学大学院システムデザイン・ マネジメント研究科
Publication year	2009
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2009年度システムエンジニアリング学 第1号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40002001-00002009-0002

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

修士論文　　2009 年度

三次元スキャナを用いた
円柱状物体の形状測定

伊東 恭子
（学籍番号：80833022）

指導教員　狼 嘉彰

2010 年 3 月

慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科
システムデザイン・マネジメント専攻

論　　文　　要　　旨

学籍番号	80833022	氏　名	伊東　恭子

論　文　題　目：三次元スキャナを用いた円柱状物体の形状測定

（内容の要旨）

不定形剛体をコンテナに詰め込む作業を人間に代わって行う産業用ロボットシステムにおいて、ロボットに取り付けるレーザ光スキャン型センサを試作し、フィージビリティを考察した。

本研究は民間工場との共同研究で、不揃いの円柱状物体とそれを砕いた小石大の不定形剛体を、できるだけ隙間なくコンテナに詰め込む作業を自動化するものである。現在、工場ではこの作業をすべて人の手で行っている。対象物が重いこと、コンテナが年々大きくなり底まで手が届かないことなど、作業員の健康に影響を与える作業となっている。そこで、不定形剛体を認識する産業用ロボットの研究を行うことになった。今年度は円柱状物体を主な対象物として取り上げて研究する。

工場では、生産された製品は必ず検査や品質管理が行われる。その多くはパターンマッチング技法によって行われている。これは、産業用ロボットに取り付けられたセンサによって得られた対象物データと、あらかじめ記憶されたパターンを合わせる方法で、外れた製品を取り除く欠陥検査などに使われている。本研究は対象物が不揃いの円柱状物体であるから、この方法はそのままでは使えない。そこで、個々の形状測定を可能にする新しいロボットシステムを開発することにした。まず人間の視覚情報と同じように、センサで不定形剛体形状と位置を把握したのち、安定して把持・据置が可能な重心データをロボットハンドに伝える。ロボットハンド機構は別グループが担当する。本研究は、ロボットシステムのサブシステムとして、センサを使って円柱状物体の形状測定を行い、データを得ることを目的とする。

従来の産業用ロボットのセンシングは、人の目が２つあり距離を測るのと同じように、角度を変えて設置した２台のカメラで対象物を撮影し、距離画像を得るステレオ観察という手法を用いている。しかし、カメラには照明の影響で鮮明な画像が得られないという欠点がある。工場内は照明が不可欠であるが、工場内の照明まで考慮することはできないため、灯りの影響を受けないレーザ式スキャナを使用することとした。さらに、複数センサの組み合わせは、センサ間の位置の調整が必要なため、１台のみを用いることとした。設置個所の変更が容易になる。さらに本研究では COTS を多用し開発期間短縮を図った。選んだ市販のスキャナも、Excel ファイルが既に組み込まれているものを採用した。しかし２次元スキャナのため、独自の上下動装置を組み込み、３次元形状データの取得を可能にした。

SUMMARY OF MASTER'S DISSERTATION

Student Identification Number	80833022	Name	Kyoko ITO

Title　Shape Measurement of the Cylindrical Objects by 3D Scanner

Abstract

Picking and placing pieces of solid objects into the container are common in many industries, but they are laborious jobs. Therefore, it is quite important to reduce the laborious works. The purpose of this research is to provide a reliable equipment to measure shape and position of the cylindrical objects by using 3D scanner and by applying image processing method that calculates center of gravity of objects. We will use this result for automatic robot system capable of charging such objects into a container with high packaging efficiency compatible to human workers.

As for products produced at the factory, the inspection and the quality control are indispensable. In general, we use the pattern match method to check them. The sensor installed in industrial-use robot obtains object data. It matches to the pattern that has already been memorized. It is used for the defect inspection that removes the defective products. In this research, we target cylindrical object with different size. So, this method cannot be used. Therefore, we decide to develop a new robotic system that enabled an individual shape measurement. First of all, we get the cylindrical shape and the position by using the sensor. Next, we get the center of gravity data that can be held with stability and then passed it on to the robot hand. The charge of the robot hand mechanism is another group.

The purpose of this research is to measure the shape of the cylindrical object as a subsystem of the robotic system. Usually, sensing of the industrial-use robot is using the technique of stereo observation that the same way as man's having two eyes. However, there is a fault of not obtaining the clear image to use cameras because of the lighting. In the factory, the lighting is indispensable. We cannot consider even the lighting in the factory. So we decided to use the laser type scanner because it is not influenced the light. In addition, it is difficult to adjustment of the position between sensors when we use 2 or more sensors. So, we decided to use only one sensor.

In this research, we used a lot of COTS to shorten the development period. We chose the scanner on the market that the Excel file has already been built into. But it was 2 D scanner, so we built in an original device moves up and down and then can get the 3 D data.

Key Words: Shape Measurement, 3D Scanner, Cylindrical Objects, Shape, Position, Gravity, Automatic Robot System, Charging, Packaging

目次

第１章　　緒論
１－１．研究の背景　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1
１－２．研究の目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2
１－３．関連研究と本研究の特徴・・・・・・・・・・・・・・・・ 5

第２章　　測域センサの３次元化と３次元測定
２－１．２次元センサ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 7
２－２．センサの３次元化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・11
２－３．３次元スキャナによる画像取得・・・・・・・・・・・ 15

第３章　　データ処理プログラム
３－１．スキャナ起動・待機・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 16
３－２．スキャナによる測定・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 19
３－３．スキャナ停止・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 25

第４章　　測定例
４－１．対象物の表面材質による依存性・・・・・・・・・・・・ 26
４－２．円柱状物体の画像・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 30

第５章　　結論
５－１．ロボットハンドへの取り付け・・・・・・・・・・・・・ 34
５－２．研究の成果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 35
５－３．今後の課題・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 36

参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・37
謝辞　　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・38

資料－１　測域センサ仕様・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・39

第１章．緒論

１－１．研究の背景

工場生産の現場に産業用ロボットが導入されて久しい。工場で生産された製品は必ず検査や品質管理が行われる。産業用ロボットに取り付けられたセンサが、あらかじめ場所や形が決まっている対象物をパターンマッチング技法で検査や確認をすることが一般的である。パターンマッチング技法は、目視の代替として特定部位の組み立てや記憶された規格からはずれた製品をとりのぞく欠陥検査などに必須の機能となっている。

今回、民間会社の工場と共同研究を行うことになった。テーマは、不揃いの円柱とそれを砕いた小石大の不定形剛体をできるだけ隙間なく容器の中に詰め込む作業の一部の自動化である。現在、対象の工場ではこの工程すべてを人の手で行っている。対象物が重いこと、詰め込む容器が年々大きくなり底まで手が届かないことなど作業員の健康に影響を与える作業となっている。そこで、不定形剛体を認識する産業用ロボットの研究を行うことにした。従来のパターンマッチング技法はそのままでは使えないため、個々の形状測定を可能にする新しいロボットシステムを開発する。まず人間の視覚能力と同じように、センサで不定形剛体形状と位置を把握したのち、安定して把持・据置が可能な重心(中心)データをロボットハンドに伝える。ロボットハンド機構は別グループが担当する。本研究は、個々の不定形剛体形状と位置を光学的センサで測定し、測定値と重心のデータを得ることを目的とする。今年度は円柱状物体のみを自動化する。対象工場の現状と目標を As is-To be で図 1 に示す。自動化する作業を

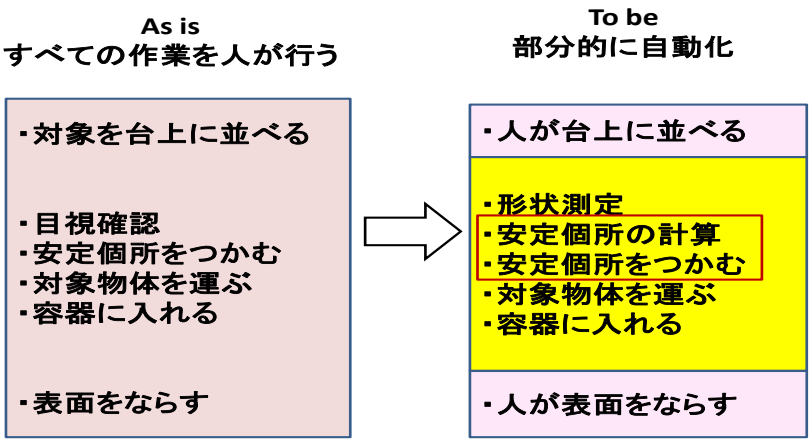


図 1. 対象工場の現状と目標

黄色で示した。これが共同研究の内容である。その中の赤枠で囲んだ部分を本研究で行う。その他の黄色の部分はロボットハンド機構グループが担当する。

１－２．研究の目的

本研究の目的は、産業用ロボットシステムのサブシステムとして、円柱状物体の形状と位置を３Ｄスキャナで測定し、ロボットハンドにその位置と大きさを提供することである。図 2 にシステムの全体図を示す。次に Goal Statement を述べ、最後に要求分析を V モデル（図 4）で示す。

本ロボットシステムは３つのサブシステムで構成され、以下の機能を有する。

① センササブシステム：円柱状物体の長さ、直径、中心点を測定し、ロボットハンド機構に送る。

② 全体制御 PC：センササブシステムから計測結果を受け取り、ロボットハンド機構を制御する。

③ ロボットハンド機構：機械的に連結したアームとハンドで構成される。全体制御 PC からアームおよびハンドを制御し、円柱状物体を把持および据置する。

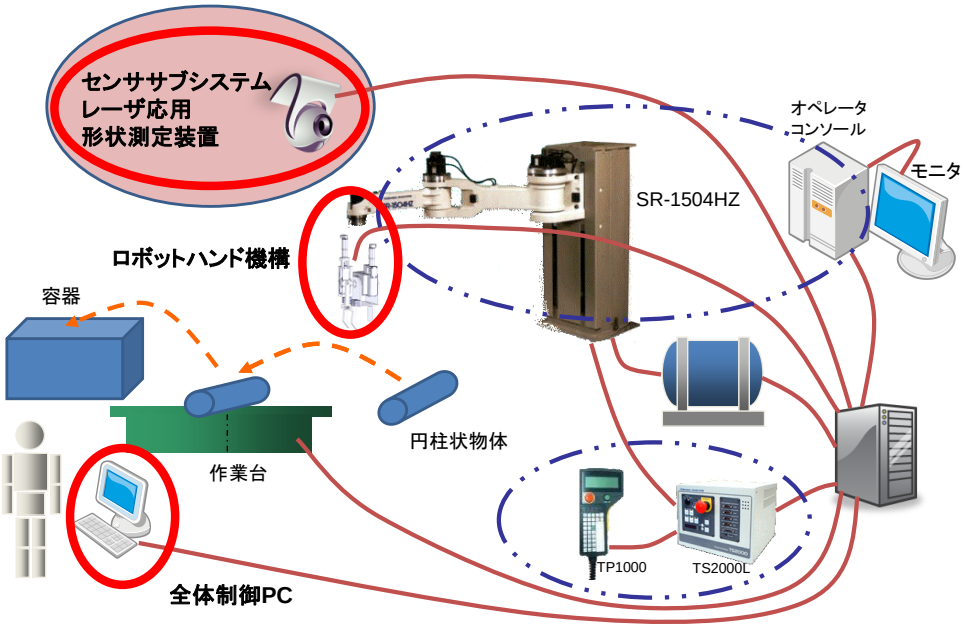


図 2. システムの全体図

１－２－１．　センササブシステム

センササブシステムは、スキャナ、上下動機構、スキャナと上下動機構を制御する制御 PC、制御 PC ソフトウェアの４つの要素から成る。各要素の働きは下記のとおりである。図 3 にサブシステムの構成要素を示す。

① スキャナ：市販の２次元測域センサを使用する。光式距離センサで照明や明るさに左右されない。データを Excel に保存する機能を持つ。

② 上下動機構：３次元データ取得のために、スキャナを搭載し上下動する機構を製作した。スキャナ、上下動機構枠、モータ、エンコーダおよび制御装置の４つで構成される。

③ 制御 PC：全体制御 PC からの指示に従い、USB と CAN を通し上下動機構を制御する。さらに得られた３次元データを保存する。

④ ソフトウェア：制御 PC 上に搭載されるソフトウェアで、円柱状物体の測定処理を行う。

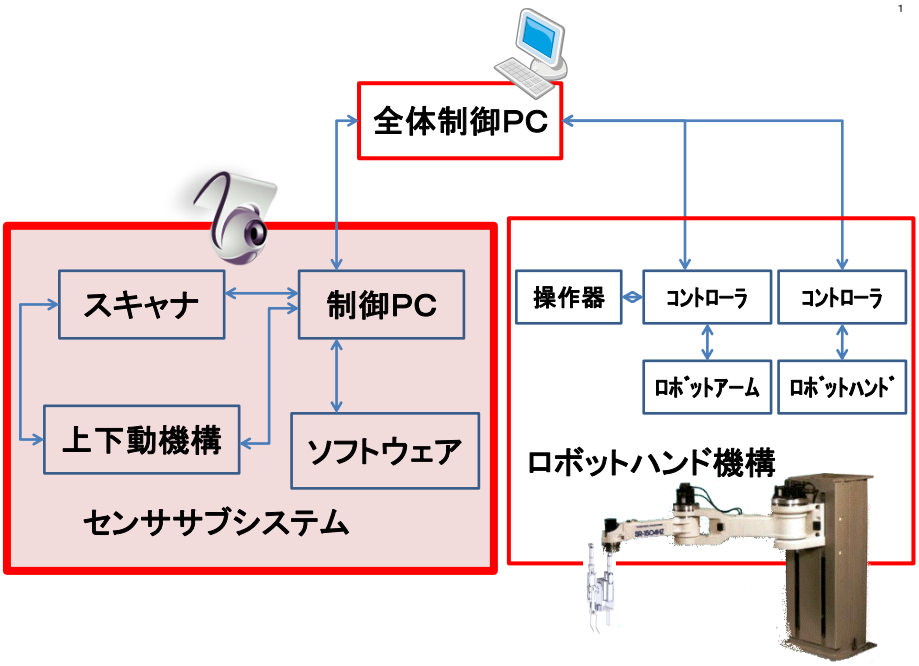


図 3.　サブシステムの構成

「産業用ロボット」の定義：

自動制御によるマニピュレーション機能または移動機能を持ち、各種の作業をプログラムによって実行できる産業に使用される機械

JIS　B　0134：1998『産業用マニピュレーティングロボット用語』より

１－２－２．　本研究の目標（Goal Statement）

To:　　ロボットシステムに円柱状物体の位置(X,Y,Z)と長さ、直径を提供する
By:　　光学的な３次元形状測定により
Using:　上下動可動装置付きスキャニングレーザ距離計(スキャナ)と画像処理手法を使い

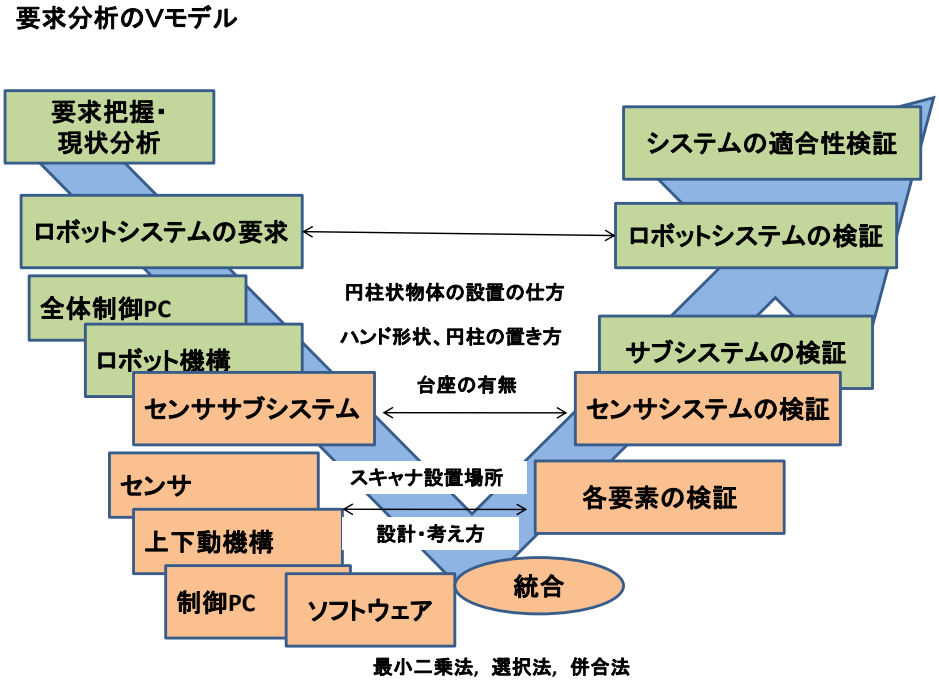


図４．Ｖモデルによる要求分析

１－３．関連研究と本研究の特徴

人の目が２つあるのは奥行き方向の距離を感じるためである。このことから人の目の代替としてセンサを利用する場合は、角度を変えて設置した２台のカメラで同じ対象を撮影し距離画像を得るステレオ観察といわれる手法が一般的に行われてきた。近年は、カメラ１台とスキャナ１台の組み合わせ、３台以上のカメラにより物体の陰になり隠される箇所も撮影する方法など３次元画像を得る試みもある。得られた画像はパターンマッチング法により製品検査に使われている。

本研究は個々の対象物形状が異なるため、パターンマッチング法は用いず個別測定という新しい試みになる。

従来研究の中で本研究に類似するものとしては、パターンマッチングによる円柱移動の自動化が発表されている。定形物体に適するもので、複数のセンサを用いての研究である。

また産業用ロボット以外の類似研究として、2005 年から続けられている筑波大学知能ロボット研究室によるスキャナを使用したロボット自立走行“つくばチャレンジ”がある。さらに 2009 年 6 月に、本研究と同様の研究の中で同様の装置(後述)を開発して３次元画像の入手に成功したという筑波大学の論文がある。研究室レベルでの試作とのことで実用性は不明である[(1)(2)]。

特殊な専門分野においてはすでに高度な個別画像処理技術が構築されている。たとえば医療の分野では MRI や超音波エコーのような専門的な高額機器が開発運用されていて、個々の患者の病巣を高精度３Ｄ画像に映し出すことが日常的に行われている。しかし医療現場では不可欠な技術でも他分野ではここまでの精度が必要とは限らない。状況に応じ精度について選択が求められる。本研究の要求事項は円柱状物体の直径、長さ、設置場所のデータを求めることである。またロボットハンド先の直立指が２㎜幅の運動範囲、屈伸指が１４㎜幅の運動範囲を必要とすることから、２㎜ 以内の測定誤差は吸収されてしまう。よって精度としては数ミリの計測が可能であればよいことになる。本研究の特色として対象物の色を考慮する必要がない。また円柱状物体という形が既知であることから完全な３次元データが得られなくても要求事項は算出できる。このように今回の要求は独特で、この要求を満たす３次元センサはない。一般的に３次元センサは高度な精度や性能が搭載され高価であるが、そこまでは不要なことから、この作業現場で使用可能な簡易３次元センサシステムを作る必要がある。よって、物体の３次元形状データと設置場所の２次元データを求めることができる３次元センサを試作することにした。

カメラ撮影の問題点として、照明や明るさという外部環境によっては鮮明な画像データが得られないことがあげられる。たとえば影を対象物と認識してしまうことである。工場内には必ず照明が点いている。工場内の照明まで考慮することはできないのでどのような環境でも正確なデータを取ることができるセンサを選ぶ必要がある。これにはレーザ式スキャナが適当である。さらに複数のセンサの組み合わせはセンサ間の位置調整が必要になるため、1 台の使用を検討する。納期を考慮してプログラムや使用部品には COTS (commercial off-the-shelf)や公開ツールの利用も考える。

実機を借り受け試用・検討した結果、北陽電機㈱製スキャナの２次元測域センサ UBG-04LX-F01 を採用することにした。ロボティクス用スキャニングレンジセンサとして距離測定に実績がある。測域センサとは、光により検知物までの距離を測定する光式距離センサで照明や明るさに左右されない。本研究は２次元スキャナを改良し３次元データを取得することを試みる。以上のことから、今回の研究は以下の特徴があるといえる。

① スキャナは測域センサ１台とする。
② スキャナは１０万円台の市販品を使う。
③ ２次元スキャナを改良し、３次元データを得る。
④ COTS や公開ツールを使い開発時間を短縮する。

※ COTS（英語:commercial off-the-shelf、COTS）とは、既製品で販売やリースが可能なソフトウェア製品やハードウェア製品、または一般向けにライセンス提供されるものを採用することで、多くの企業や政府が COTS の採用を積極的に行いつつある。動機はシステム開発のコスト削減と開発期間の短縮である。

（出典: フリー百科事典『ウィキペディア（Wikipedia)』）

第２章　測域センサの３次元化と３次元測定

２－１．　２次元センサ

採用した北陽電機(株)製の測域センサ UBG-04LX-F01 は以下の特色を持つ。

① 光式距離センサで照明や明るさに左右されない。
② 対象物の形状を２次元で検出する。
③ ２次元データを Excel ファイルに保存する。
④ 小型軽量である。(W60mm×D60mm×H75mm,　本体約 185g, ケーブル１m 込み約 260g)

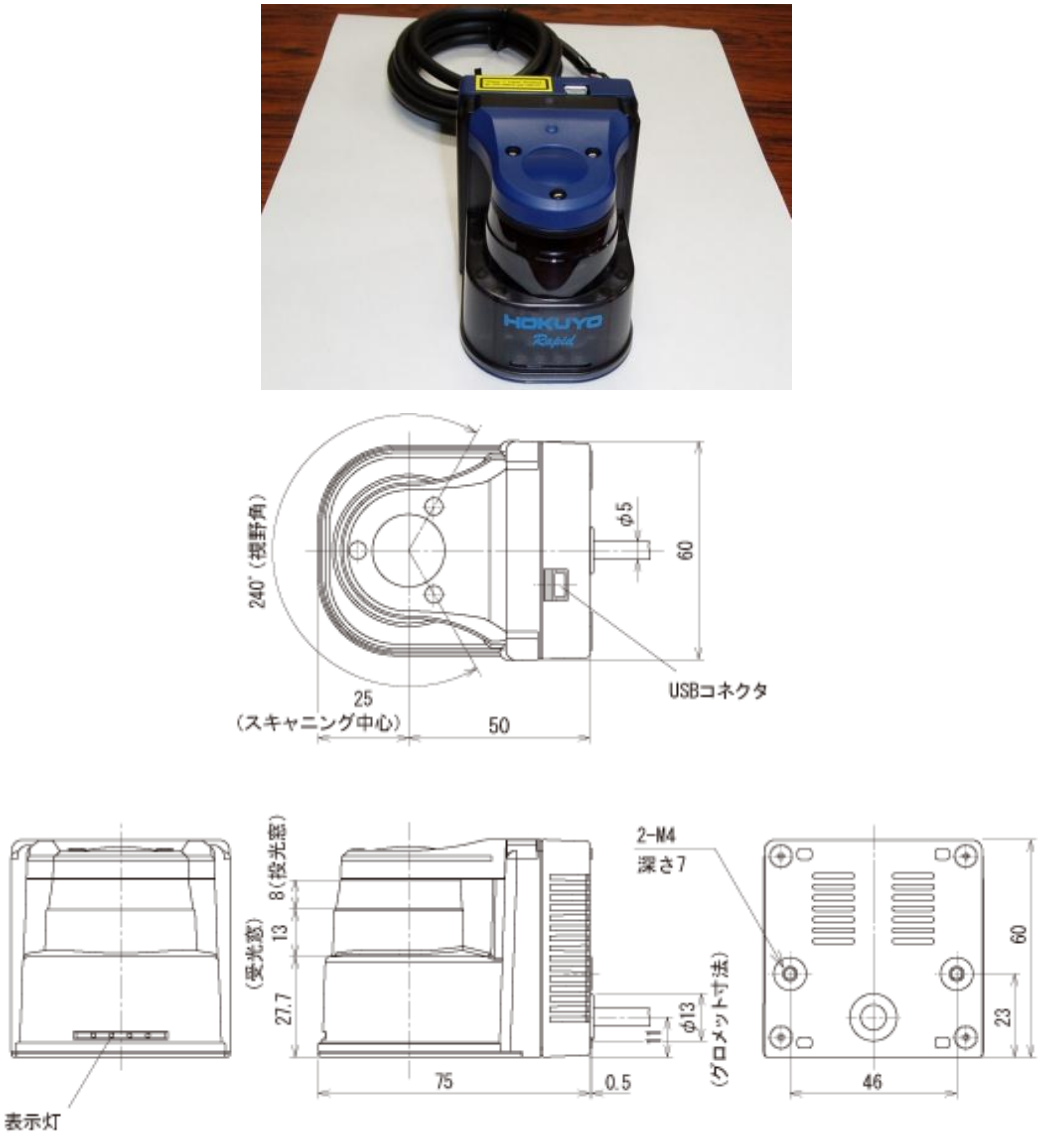


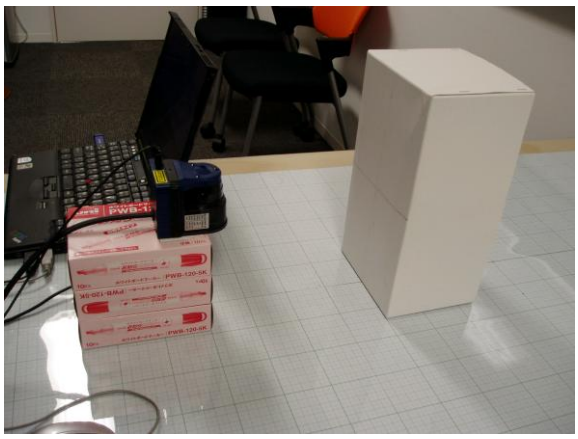
図 5. 実機写真と外形寸法図

２－１－１．　データ取得

測域センサ UBG-04LX-F01 は、レーザ光により水平面上の空間を約 0.36 度(360°/1024 分割)ピッチで 240 度スキャンし、物体との距離と方向を検出する。本プログラムでは、不要なデータを拾わないようにスキャン範囲を 90 度(＋45 度 256 ステップ～－45 度 512 ステップ)に限定した。したがって 1 走査で 256 個のデータを取得する。取得データは Excel ファイルに保存される。表 1 に保存されたデータの一部を示す。1 回分のデータを Excel 表示すると 1024 行のボリュームになる。スキャン走査を図で示した(図 6)。走査で得られたデータを x-y 平面に表わしたのが図 7 である。これはある高さでの物体データであるから、高さを変えてこのデータを積み上げてゆくと、3 次元データが得られると考えられる。

図 6.　スキャン走査の図示

(単位：mm)



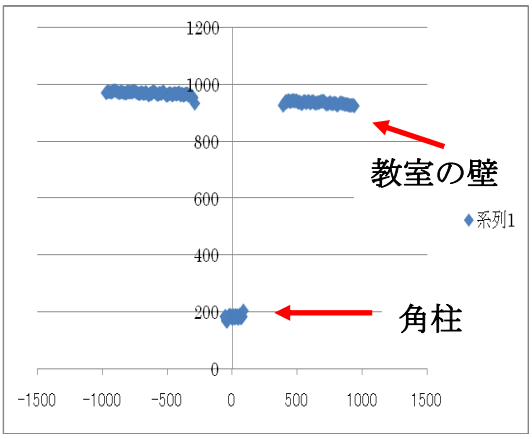


図 7.　測定データの２次元表示

表 1.　Excel によるデータ保存

（単位：mm）

ステップ	X	Y
255	955	943
256	943	943
257	937	949
258	930	953
259	915	949
260	902	948
261	896	953
262	890	959
263	880	959
264	870	960
265	826	923
266	818	925
267	810	927
268	797	924
269	784	921
270	777	923
271	771	928
272	764	931
273	750	926
274	741	925
275	733	928
276	727	931
277	717	931
278	708	931
279	700	932
280	691	931
281	683	933
282	677	936
283	668	936

２－１－２．２次元データ取得

データ取得の際には、誤差を考慮して、１走査を４回繰り返し平均値をとる。取得データのステップ値、x 値、y 値を図８に示した。（単位：mm）

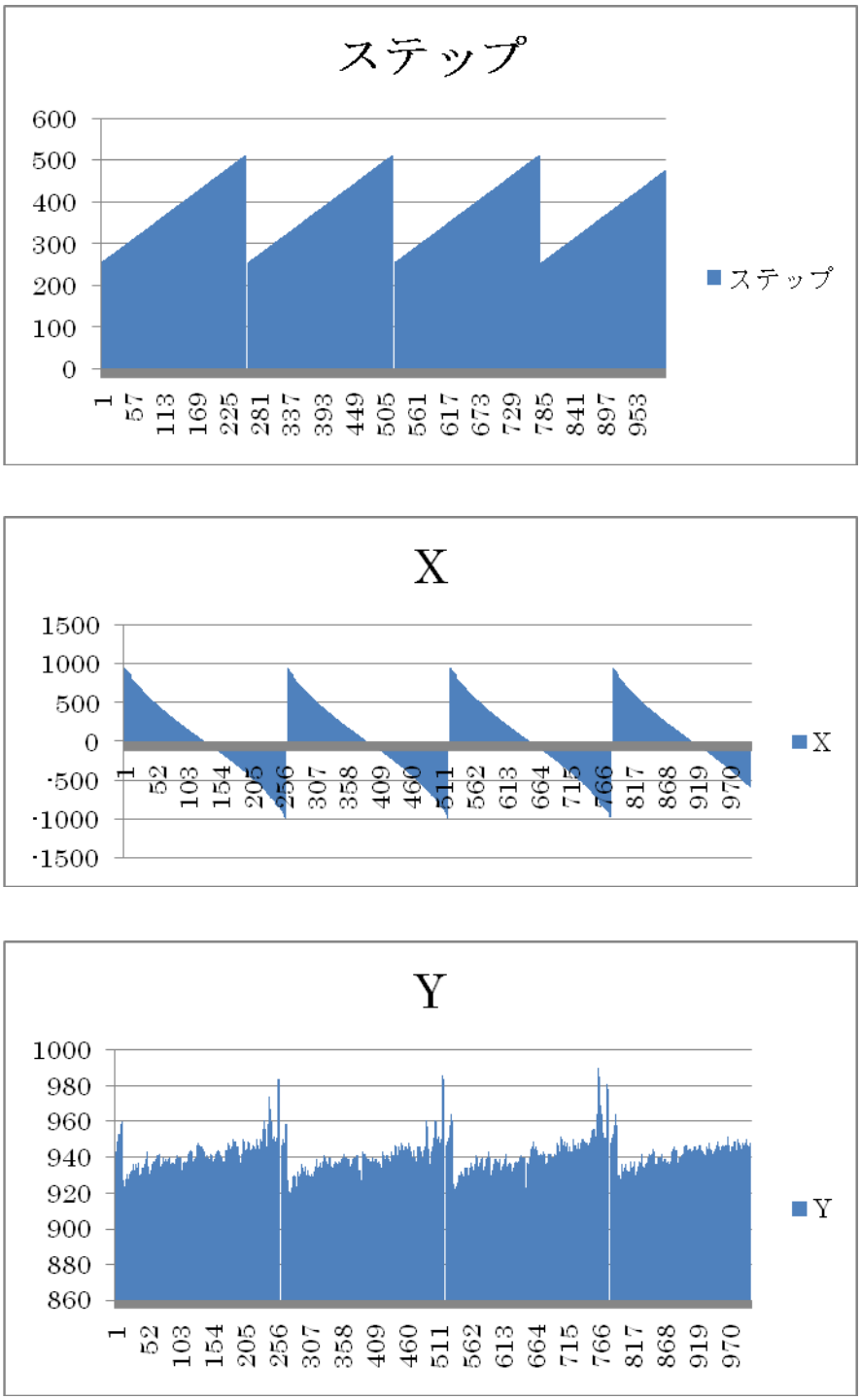


図 8.　データの４回取得

２－２．　センサの３次元化

今回使用したスキャナは２次元計測器のため３次元計測には改良が必要であることから、スキャナの３次元化を試みた。３次元化のためにはエレベーションを考慮しなければならない。そのため、モータとエンコーダを組み合わせた独自の上下動装置を製作した。この装置は、スキャナ、上下動機構枠、モータ、エンコーダおよび制御装置の４つで構成されている。大きさは W210mm×D250mm×H102mm である。

装置のしくみとしては、まず、ギア付モータの出力角度をエンコーダが検出してフィードバックする。フィードバックされた角度と目標角度との誤差をコントローラが調節してモータを制御することで、モータは目標値に従って上下動する。上下動機構枠に組み込んだスキャナの中心とモータ出力回転軸を直結させたことで、スキャナとモータは同時に上下動し、３次元計測が可能になった。表 2 に３次元計測で得られた Excel データを示す。図 8-1 は表中データの内容を Azimuth スキャンと Elevation スキャンを用いて示したものである。図 9 に３次元スキャナの写真を示す。図 10 は制御ブロック図である。モータおよびエンコーダは下記製品を使用した。スキャナ原点と上下動装置回転軸を一致させたことより、Ｘ値、Ｙ値はセンサベース座標系と同値になる。回転軸は鉄板面から 75mm 上にある。モータはギア比が 3.2 より、112.5 ステップで一回転する。また、エンコーダの分解能が 0.72°であることからスキャン間隔は 0.72°刻み、80 ステップをスキャンすることにした。スキャン角度は水平面をはさんで上下 28.8°づつ、合計 57.6°を上から下にスキャンする。

図 11 に３次元スキャナの詳細を示す。図 12 に組立図を示す。

モータ型番 ： maxson DC motor 118751

エンコーダ型番 ： HEDL-5540 A02（分解能：1 回転/500 パルス＝0.72°）

表 2. 3 次元データの Excel 表示例

	Ic	Z	X	Y	Iφ	
256～512 ステップ Azimuth	256	1786	1270	1255	Iφ =0	0～79 回 Elevation
	・・・					
	512	3045	-2153	2153		
	256	1789	1272	1257	Iφ =1	
	・・・					
	512	3049	-2155	2155		
	256	1771	1259	1244	Iφ =2	
	・・・					
	512	3056	-2160	2160		
			・			
			・			
	256	335	238	235	Iφ =79	
	・・・					
	512	330	-233	233		

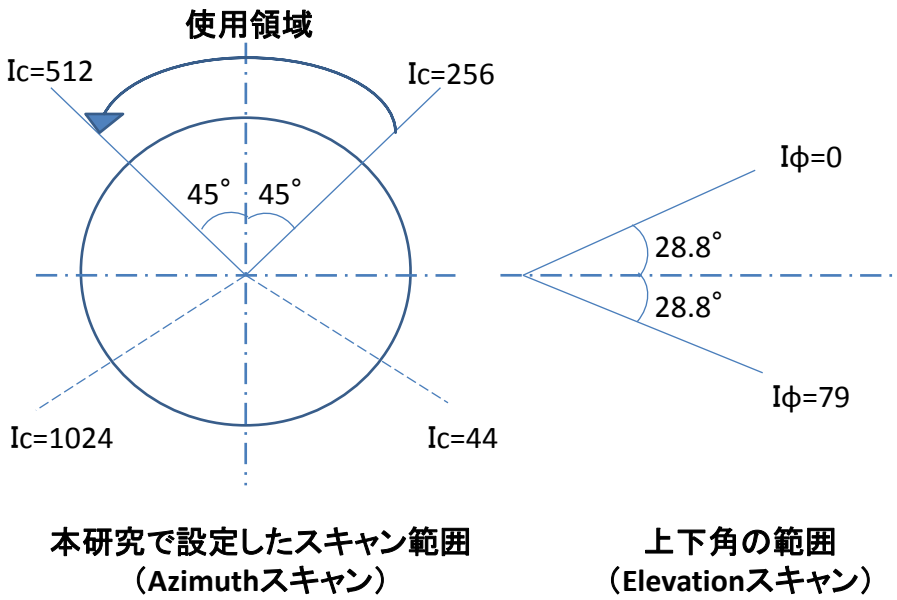


図 8-1.　Azimuth スキャンと Elevation スキャン

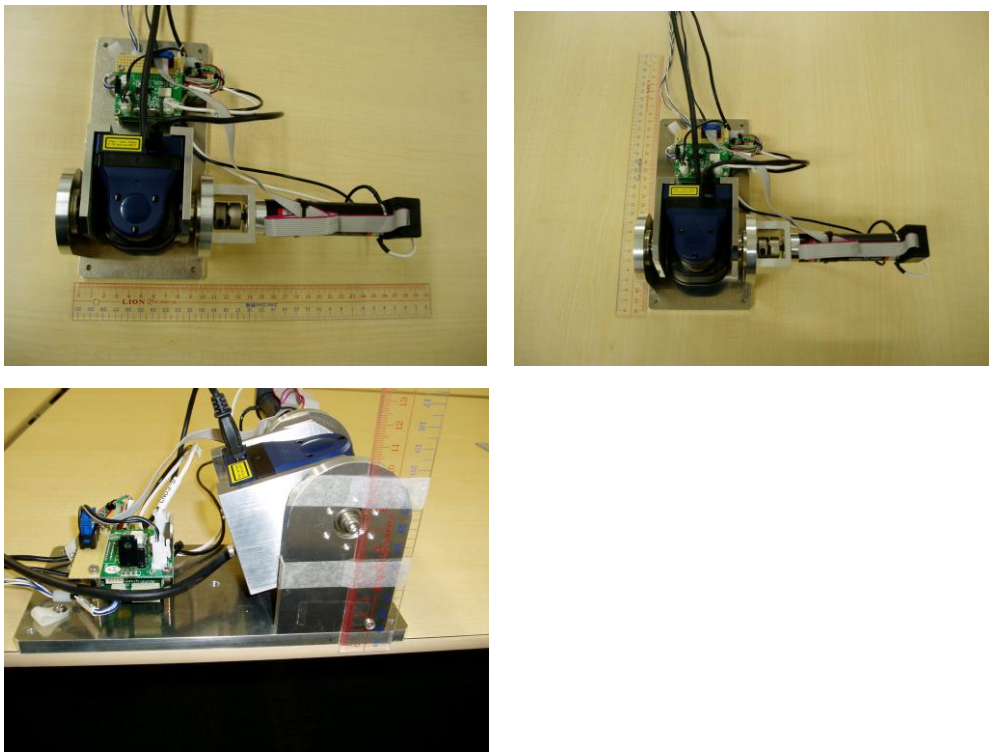


図 9.　３次元に改良したスキャナ（２１０mm×２５０mm×102mm）

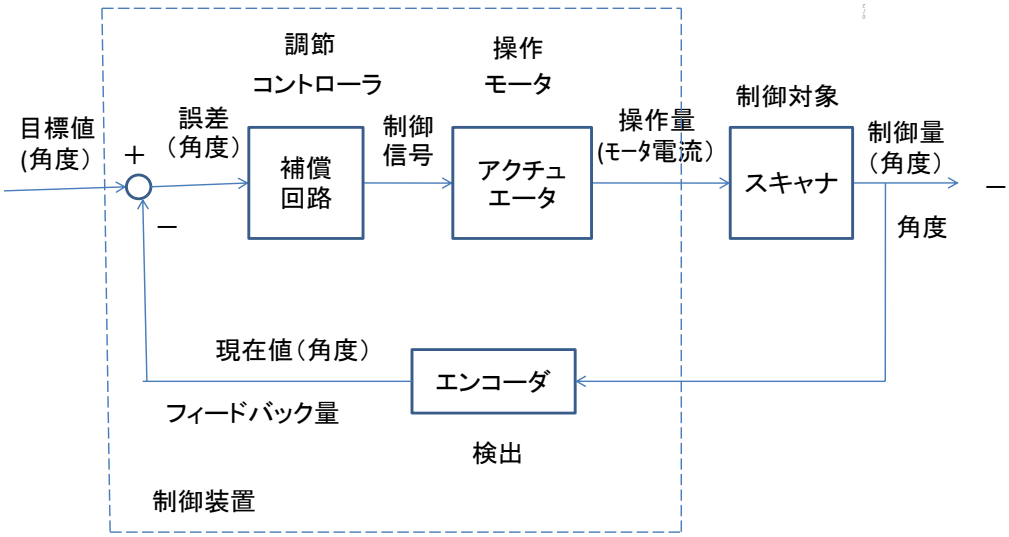


図 10.　制御ブロック図

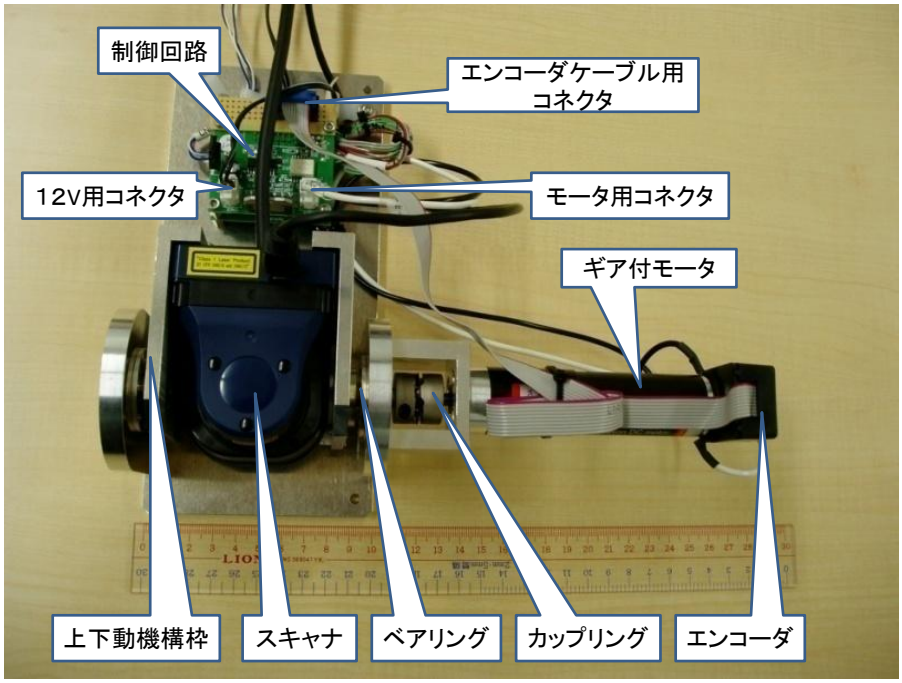


図 11.　3 次元スキャナ詳細

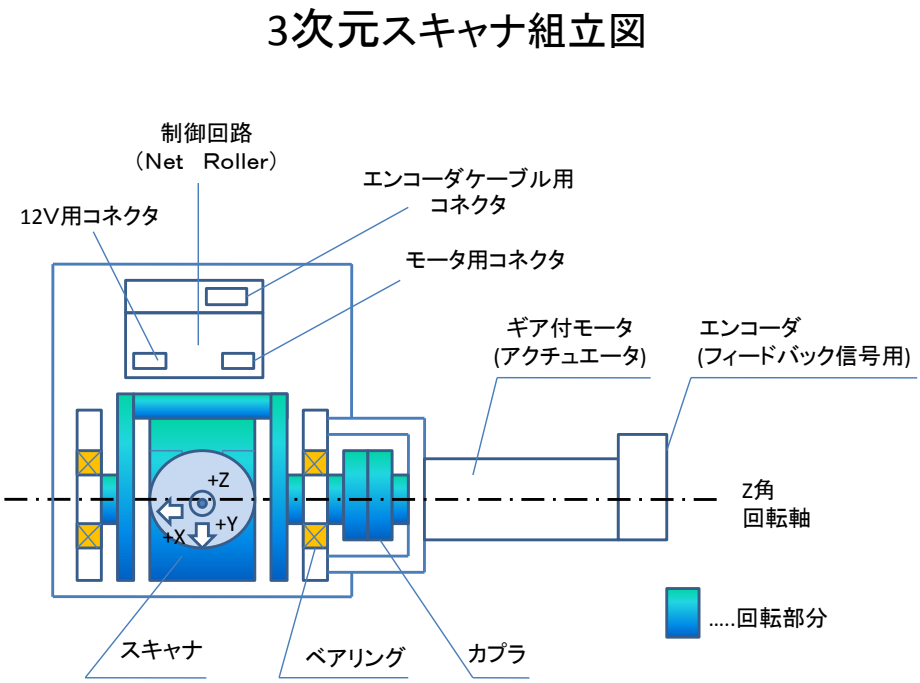


図 12.　3 次元スキャナ組立図

２－３．３次元スキャナによる画像取得

円柱状物体の画像を示す。図 13 は直径面をスキャンした。本研究で画像として最初に得られたものである。テーブル面、直径面、教室の壁が確認できる。図 14 は斜め上から側面をスキャンした。Excel データを gnuplot を使って画像処理をした。テーブル面および円柱のカーブが確認できる。

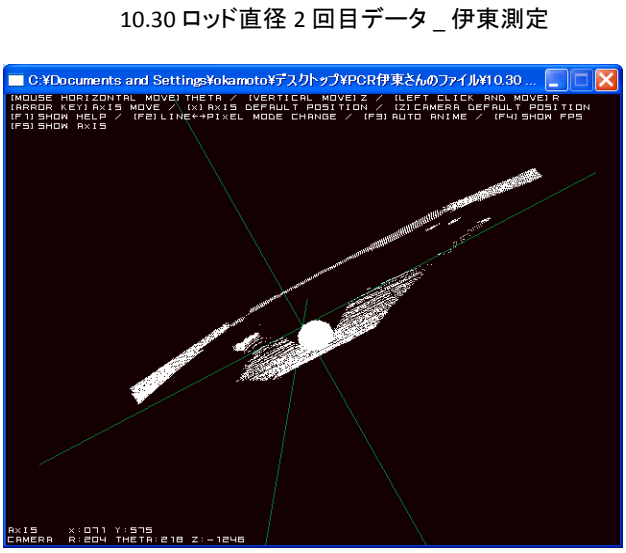


図 13.　円柱状物体の画像(直径)

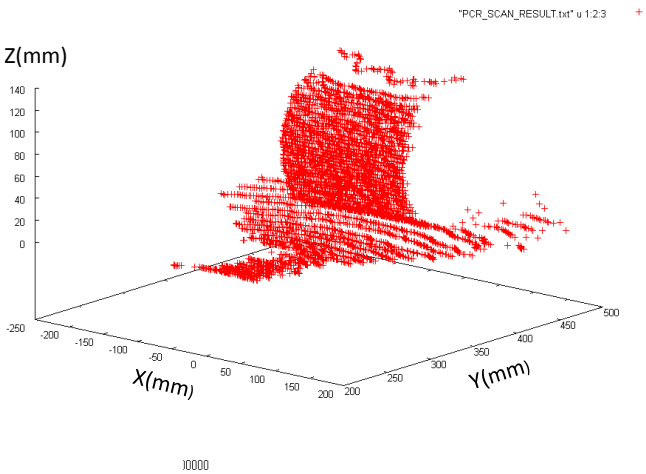


図 14.　円柱状物体の画像(側面)

第３章.　データ処理プログラム

本章ではデータ処理するプログラムについて述べる。処理の流れをフローチャート（図 15）に示す。流れにそって説明する。

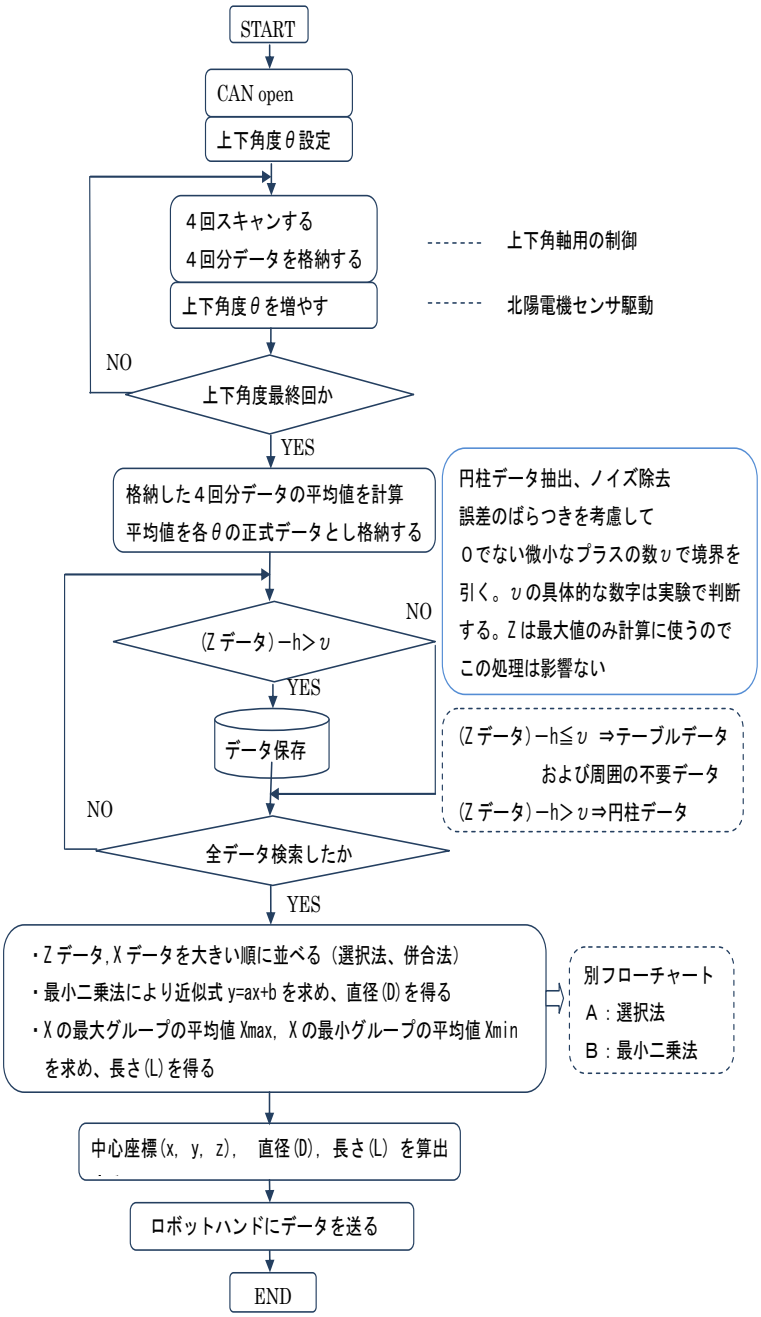


図 15.　全体フローチャート

3-1.　スキャナ起動・待機

3-1-1. 運用モード

センササブシステムは、スレーブモードとスタンドアロンモードがある。

① スレーブモード

センササブシステムが全体システムの構成要素として動作するモードである。制御PC から要求コマンドを受信し測定を行う。制御PC に応答を送信する。

② スタンドアロンモード

センササブシステムが全体システムとは独立したスタンドアロンで動作するモードである。センササブシステム内のエージェントから要求コマンドを受信し測定を行い、応答を返送する。エージェントとは、制御PC を模擬するソフトウェアで、センササブシステム制御PC 上に存在することを想定する。

3-1-2. 指示データ

制御PCとセンササブシステム制御PC間は、指示データを送受信する。センサは必ずロボット制御PCからの指示を受けて動く。ロボット機構が動いている時、センサは停止している。同時に動くことはない。常に後からの要求を優先する。指示データを表3に示す。

表3. 指示データ

データ名称	Token	値	内容
要求・応答種別	reqres	0	要求
		1	応答
要求種別	req	0	測定開始要求
		2	測定停止要求
エラー種別	err	0	正常
		10～19	ロボット側異常
		20～29	センサ側異常
		30～39	電源異常
		40～49	外部異常
物体本数	rnum	整数	物体本数

3-1-3. 座標変換

まず座標の変換を考える。当初は極座標による距離(r)と角度(α)から物体の位置を求め x-y 座標平面に 2 次元変換した。 3 次元化のためのエレベーション角を θ とし、テーブル面からスキャナまでの高さを hz とすると、座標変換は以下のように表わされる。

・ 当初の極座標から直交座標(2 次元)への変換

$$\begin{cases} X = r\cos\alpha \\ Y = r\sin\alpha \end{cases}$$

・ 直交座標(2 次元)から直交座標(3 次元)への変換

$$\begin{cases} X = r\cos\alpha\sin\theta \\ Y = r\sin\alpha \\ Z = hz - r\cos\alpha\cos\theta \end{cases}$$

以上から、任意の点 P の座標は

$P(X,Y,Z)=P(r\cos\alpha\sin\theta,\ r\sin\alpha,\ hz-r\cos\alpha\cos\theta)$

となる。図 16 に座標変換図を示す。

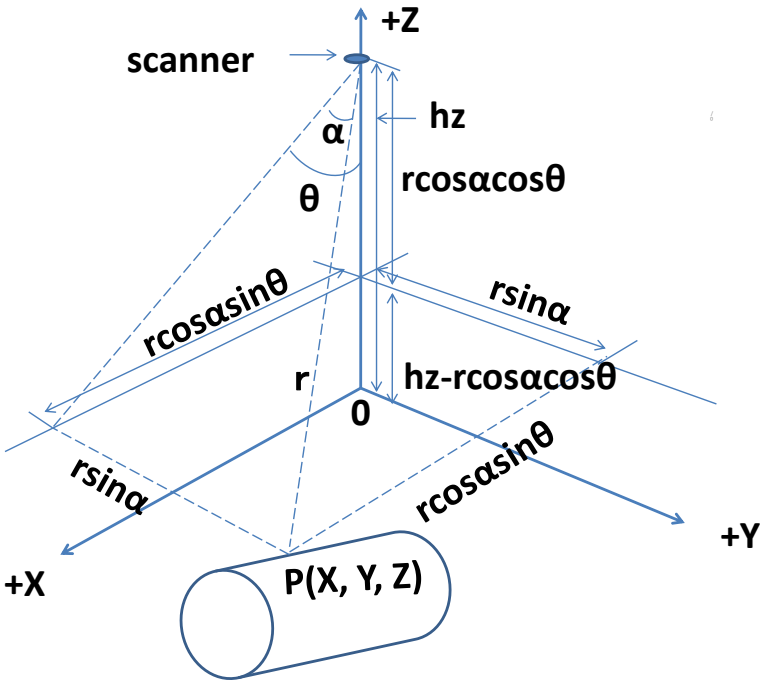


図 16. 座標変換図

3-1-4. センササブシステム起動

1. センササブシステムを構成する各部を起動する。
2. 制御PC ソフトウェアを起動する。
3. スレーブモード／スタンドアロンモードを指定する。
4. 待機状態に入る。

3-2.スキャナによる測定

3-2-1.測定の流れ

1. 測定要求を受信する。
2. スキャナを用いて、測定処理を行う。
3. 応答として、測定データとエラー種別を送信する。
4. 応答送信後、待機状態となる。

2. のスキャナの測定処理について以下に詳しく述べる。

3-2-2. データ取得

スキャナによるデータ取得の流れについて説明する。

a. ある標高で、1 走査分の円柱状物体の3次元データを得る。
1 走査分のスキャン範囲は、正面より±45度(+45度～－45度)の範囲とした。不要なデータを拾わないために限定した。0.36度きざみでデータ取得するので、ステップ数は256(－45度256ステップ～＋45度512ステップ)となる。

b. 誤差を考慮し4回繰り返し取得する。

c. 4回分の平均を取る。このデータが、ある標高での1 走査分の円柱状物体のデータとなる。

d. 1 走査分の標高データの取得終了後、上下動機構の角度をθ度進める。本プログラムでは0.72度に設定している。変更する場合は0.72×倍数の角度とすること。使用しているエンコーダの分解能が0.72度であるからである。

e. 上下動機構118.8～61.2度における標高データを測定する。
90度をはさみ上下28.8度ずつ、80ステップ(１ステップは0.72度)を測定する。

f. Excelに測定CSVデータを保存する。

g. CSVデータには、円柱状物体とテーブル面のデータが入っているので、円柱状物体だけのデータを取り出す。
スキャナ中心～テーブル面の距離をhz(ｍｍ)とする。(Z-hz)>0となるZデータが円柱状物体データのはずである。しかし誤差によるデータのばらまきを考慮して、０よりも少し大きい数(υ)で切る事を考える。υの具体的な数字は実験の中で判断する。Z値は最大値のみ計算に使用するため支障はない。

以下にデータ取得を具体的に示す。

スキャン開始（ISCAN=0）

・１ラインのデータ取得：スキャン４回繰り返し平均をとる（誤差縮小のため）

・ライン上の取得データはＸ値、Ｙ値、Ｚ値

Z＝Z＋75（mm）と座標変換し３次元データ（X,Y,Z）を作る

1ライン目（4回取得）

$(X_{111},Y_{111},Z_{111}), (X_{112},Y_{112},Z_{112}), \cdots, (X_{11m},Y_{11m},Z_{11m})$

$(X_{211},Y_{211},Z_{211}), (X_{212},Y_{212},Z_{212}), \cdots, (X_{21m},Y_{21m},Z_{21m})$

$(X_{311},Y_{311},Z_{311}), (X_{312},Y_{312},Z_{312}), \cdots, (X_{31m},Y_{31m},Z_{31m})$

$(X_{411},Y_{411},Z_{411}), (X_{412},Y_{412},Z_{412}), \cdots, (X_{41m},Y_{41m},Z_{41m})$

・4 回スキャン終了→ISCAN=1

・ISCAN=1→角度をφ°動かす（今回はφ＝0.72）

・角度をφ°移動終了→ISCAN=0

・次ラインを 4 回スキャンへ続く

・必要回数（ｎ回）繰り返し、データ取得する

1ライン目（4回取得）

$(X_{111},Y_{111},Z_{111}), (X_{112},Y_{112},Z_{112}), \cdots, (X_{11m},Y_{11m},Z_{11m})$

$(X_{211},Y_{211},Z_{211}), (X_{212},Y_{212},Z_{212}), \cdots, (X_{21m},Y_{21m},Z_{21m})$

$(X_{311},Y_{311},Z_{311}), (X_{312},Y_{312},Z_{312}), \cdots, (X_{31m},Y_{31m},Z_{31m})$

$(X_{411},Y_{411},Z_{411}), (X_{412},Y_{412},Z_{412}), \cdots, (X_{41m},Y_{41m},Z_{41m})$

2ライン目（4回取得）

$(X_{121},Y_{121},Z_{121}), (X_{122},Y_{122},Z_{122}), \cdots, (X_{12m},Y_{12m},Z_{12m})$

$(X_{221},Y_{221},Z_{221}), (X_{222},Y_{222},Z_{222}), \cdots, (X_{22m},Y_{22m},Z_{22m})$

$(X_{321},Y_{321},Z_{321}), (X_{322},Y_{322},Z_{322}), \cdots, (X_{32m},Y_{32m},Z_{32m})$

$(X_{421},Y_{421},Z_{421}), (X_{422},Y_{422},Z_{422}), \cdots, (X_{42m},Y_{42m},Z_{42m})$

・・・・・・・・・

・・・・・・・・・

nライン目（4回取得）

$(X_{1n1},Y_{1n1},Z_{1n1}), (X_{1n2},Y_{1n2},Z_{1n2}), \cdots, (X_{1nm},Y_{1nm},Z_{1nm})$

$(X_{2n1},Y_{2n1},Z_{2n1}), (X_{2n2},Y_{2n2},Z_{2n2}), \cdots, (X_{2nm},Y_{2nm},Z_{2nm})$

$(X_{3n1},Y_{3n1},Z_{3n1}), (X_{3n2},Y_{3n2},Z_{3n2}), \cdots, (X_{3nm},Y_{3nm},Z_{3nm})$

$(X_{4n1},Y_{4n1},Z_{4n1}), (X_{4n2},Y_{4n2},Z_{4n2}), \cdots, (X_{4nm},Y_{4nm},Z_{4nm})$

① 各ラインの平均をとる

1ライン目　$(X_{11},Y_{11},Z_{11}), (X_{12},Y_{12},Z_{12}), \cdots, (X_{1m},Y_{1m},Z_{1m})$

2 ライン目　$(X_{21},Y_{21},Z_{21}), (X_{22},Y_{22},Z_{22}), \cdots, (X_{2m},Y_{2m},Z_{2m})$

3 ライン目　$(X_{31},Y_{31},Z_{31}), (X_{32},Y_{32},Z_{32}), \cdots, (X_{3m},Y_{3m},Z_{3m})$

・・・・・・・・

n ライン目　$(X_{n1},Y_{n1},Z_{n1}), (X_{n2},Y_{n2},Z_{n2}), \cdots, (X_{nm},Y_{nm},Z_{nm})$

3-2-3.　最終データ算出

以上より、データ処理の流れは以下のようになる。

① 同一の高さを 4 回スキャンし、4 回の平均をその高さのデータとする。

② スキャンした全データを取得・保存する。

③ 全データから円柱状物体のみを取り出す。
Z データ≦＋ υ (0 より少し大きい数)となる Z データは切り捨てる。ノイズ除去のためである。データ誤差の散らばりを考慮して、0 でなく微小なプラスの数で境界を引く。具体的な数字は実験して決める。Z データは最大値を使用するため、υ に含まれてしまう物体データは考慮しなくてもよい。

④ 選択法により、データの Z 値, X 値を大きい順に並べ、Z の最大グループ、X の最大および最小グループを作る。今回は各々1000 個で構成する。Y 値は Z 値の対とし Z 値の順序に従う。併合法を使うこともできる。

⑤ 最小二乗法により Z の最大グループから y=b を近似し、Y,Z の対より y＝b 時の Z 値を求める。Z 値がない場合は近似値を Z とする。Z が直径となる。直径 D,中心の y 座標, z 座標が求まる。

⑥ X の最大グループおよび最小グループから X の最大平均値 X_{max} および最小平均値 X_{min} を求める。長さ L、中心の x 座標が求まる。
よって、下記の計算で目的のデータを得る。(図 17)

$$\begin{cases} \text{中心座標 } P(X,Y,Z)=P(L/2+\text{原点からのズレ}, b, D/2+\text{原点からのズレ}) \\ \text{長さ}(L)=X_{max}-X_{min} \end{cases}$$

直径(D)＝Z の最大値

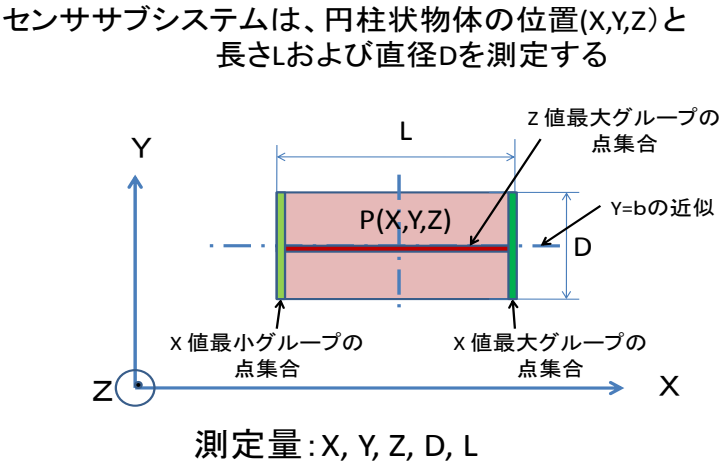


図 17. 求める最終データ

最後にフローチャートとプログラムを示す。図 18 に選択法フローチャートを示す。図 19 に最小二乗法フローチャートを示す。また最小二乗法プログラムを示す。最小二乗法はオープン CV の gnuplot も利用できる。また画像処理のオープン CV を組み合わせてデータ解析することも可能と言われている。

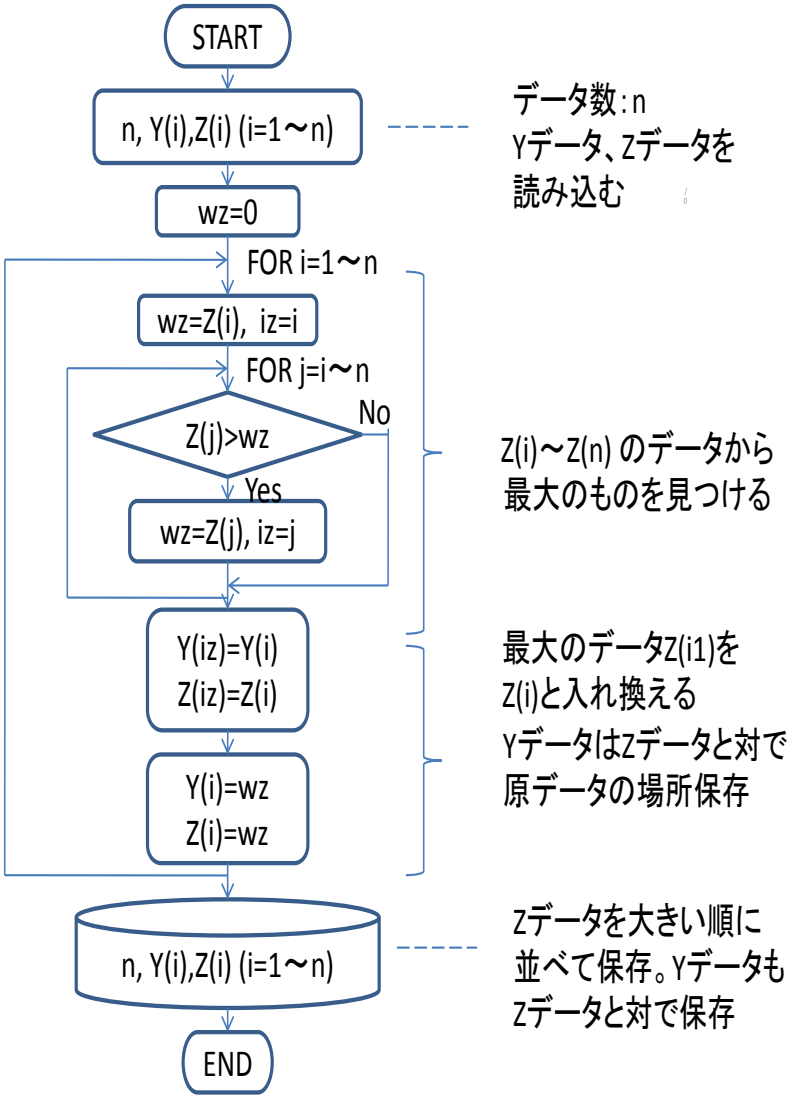


図18. 選択法フローチャート

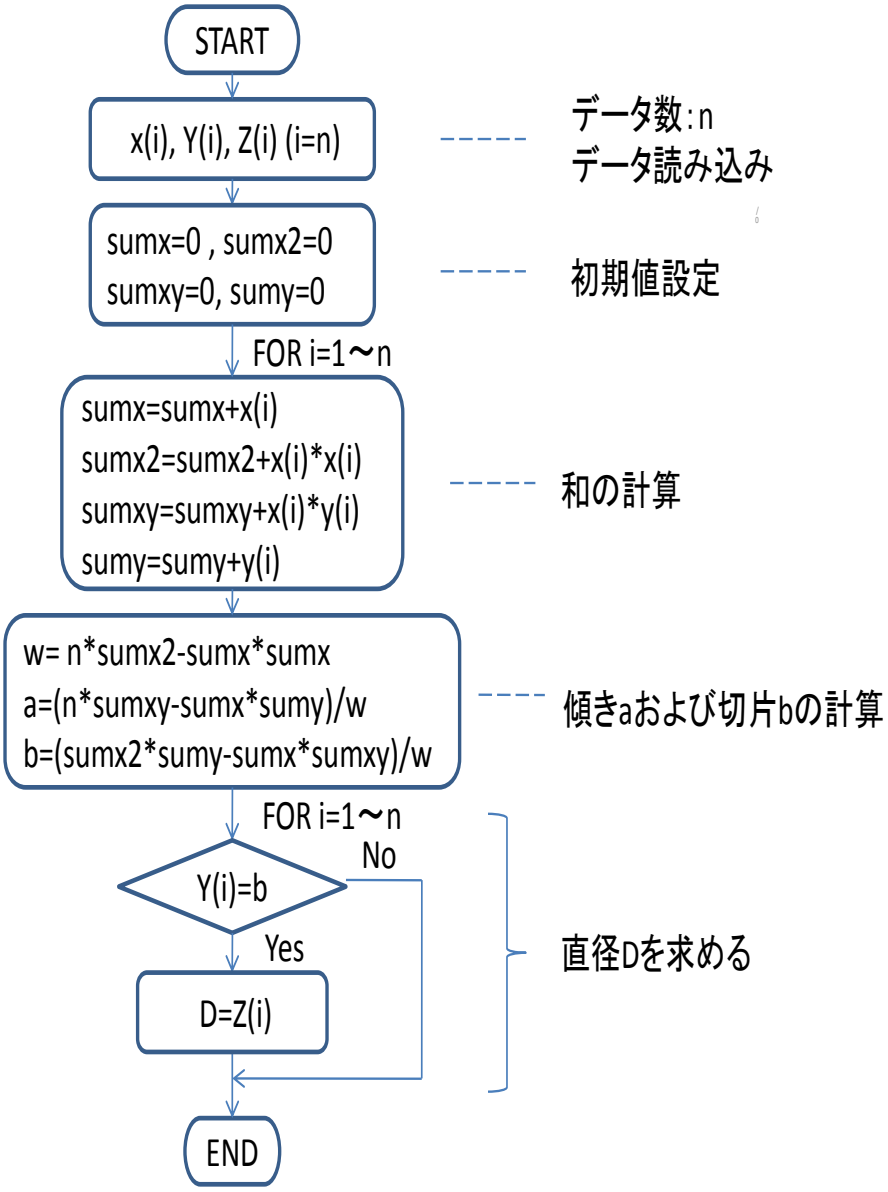


図 19. 最小二乗法フローチャート

＜　最小二乗法プログラム　＞

```
  /*          最小二乗法          */
#include <stdio.h>
#define M 1000 /*データ点の数*/
int main(){
        int i,j;
        double a, b; /*傾き, 切片*/
        double sumx=0, sumx2=0, sumxy=0, sumy=0;
        double x[M];
        double y[M];
        double z[M];
        FILE *fp;
        fp = fopen( "PCR_SCAN_RESULT.txt", "r" );
        for(j=0;j<1000;j++){
        fscanf(fp,"%f,%f,%f",&z[i],x[i],y[i]);
                fscanf(fp,"¥n");
                }
fclose(fp);
/* 和の計算*/
        for(i=0; i<1000; i++){
                sumx=sumx+x[i];
                sumx2=sumx2+x[i]*x[i];
                sumxy=sumxy+x[i]*y[i];
                sumy=sumy+y[i];
                }
/* 傾きaおよび切片bの計算*/
        a=(M*sumxy-sumx*sumy)/(M*sumx2-sumx*sumx);
        b=(sumx2*sumy-sumx*sumxy)/(M*sumx2-sumx*sumx);
/* 解の出力*/
        printf("a = %10.5f¥n", a);
        printf("b = %10.5f¥n", b);
        return 0;
}
```

3-3. スキャナ停止

3-3-1. 測定停止

1. 測定停止要求を受信する。
2. 測定処理を直ちに停止する。
4. 応答として、エラー種別を送信する。
5. 応答送信後、待機状態となる。

3-3-2. センササブシステムの停止

1. 制御 PC ソフトウェアを終了する。
2. センサシステムを構成する各部を停止する。

第４章．測定例

４－１．対象物の表面材質に対する依存性

今回採用したスキャナは本来はロボットが移動する際に周囲の障害物との距離を測るために開発された。

測定の可能性および精度は、対象の表面材質や形状に依存することより、下記Ａ～Ｄの４種のモデルを用いて実験しデータを取得した。

Ａ．表面光沢の円柱
反射して画像データを得ることができなかった。
（図 20 参照）

Ｂ．表面光沢のブックエンド
垂直面に反射してデータは取得できなかった。
（図 21 参照）

Ｃ．木材の表面
縞模様のデータが観測された。
（図 22 参照）

Ｄ．紙で覆った木材の表面
形状の算出が可能なデータが得られた。Ｃ.で得られたデータとは様子が異なっている。
（図 23 参照）

この結果から、測域センサにおいても条件によっては、対象物の表面光沢によりレーザが鏡面反射して受光部に戻らないことが判明した。本研究の円柱状物体は表面光沢がないので影響はないが、センサを選ぶ際は対象物の材質を考慮する必要がある。

A．表面光沢の円柱

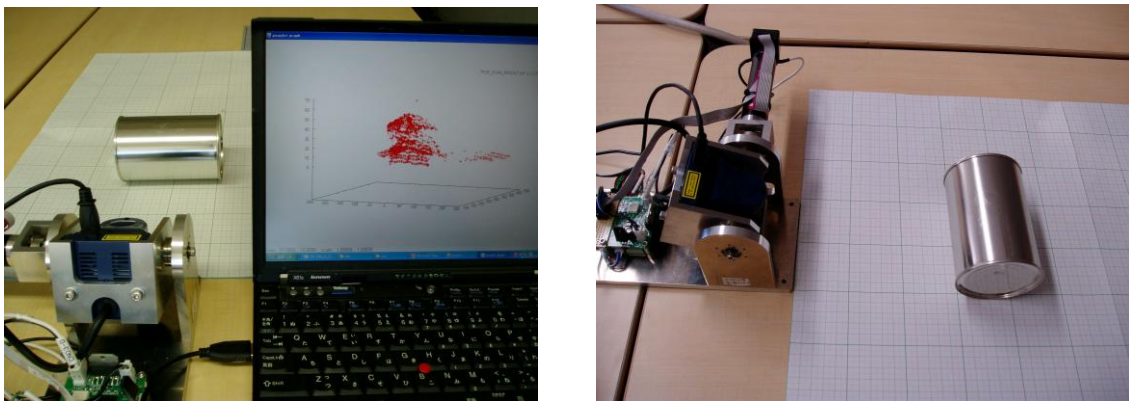
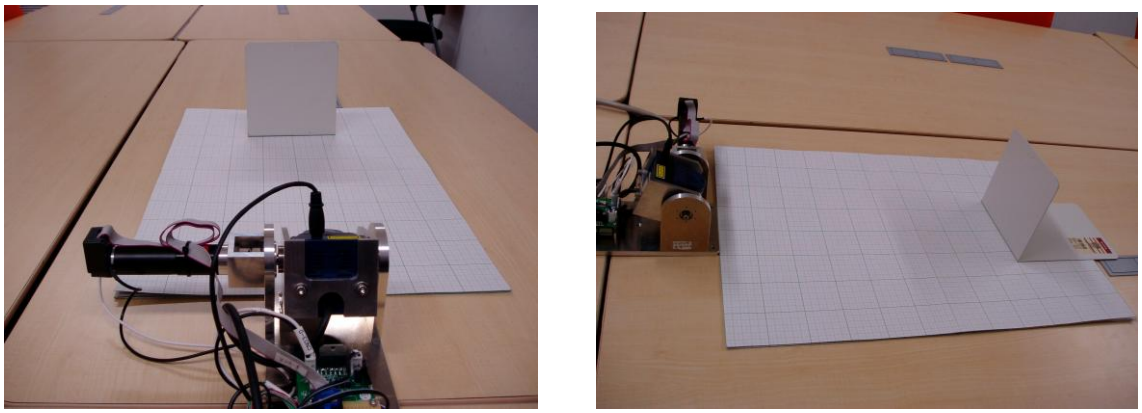


図 20．表面光沢の円柱

B．表面光沢のブックエンド



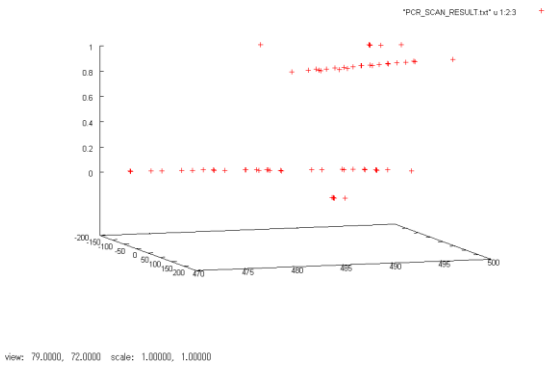
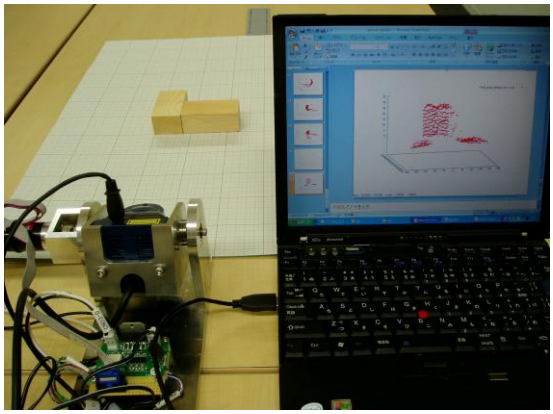
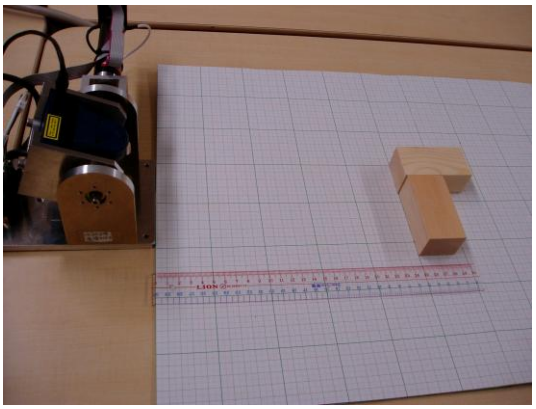


図 21. 表面光沢のブックエンド（単位：mm）

C．木材の表面





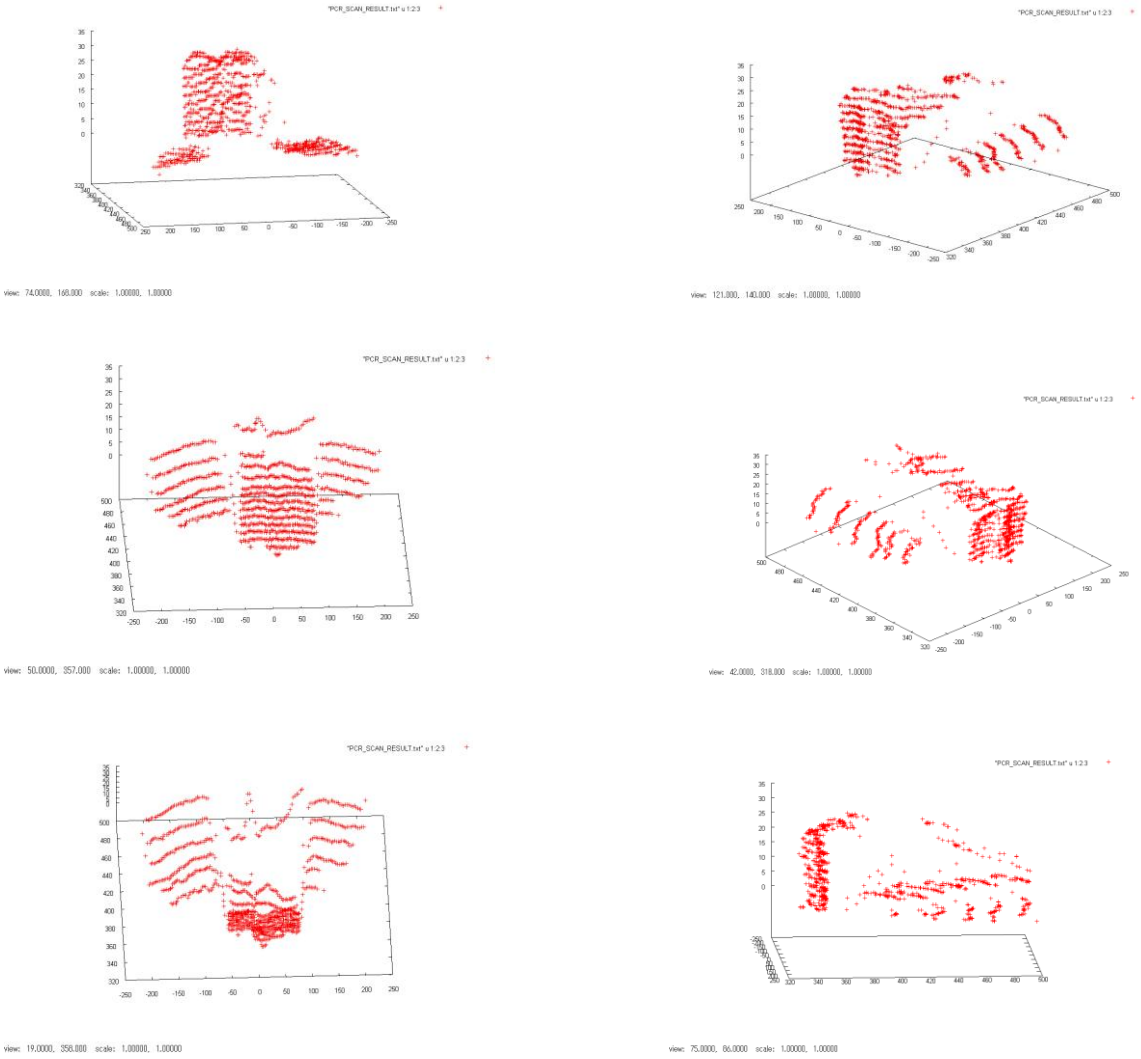
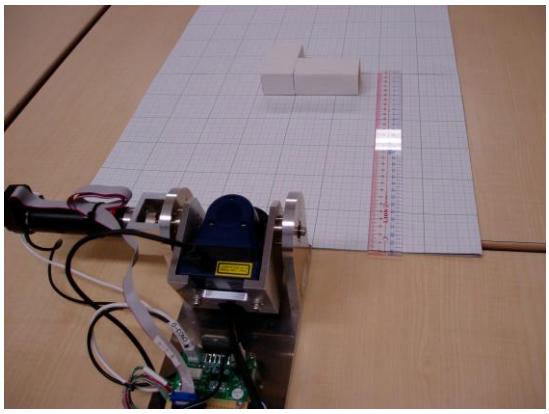
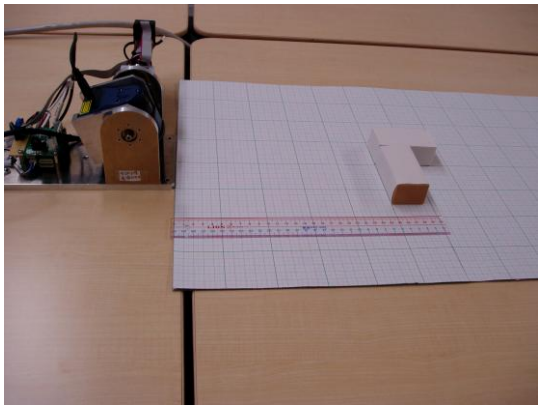


図 22．木材の表面（単位：mm）

D．紙で覆った木材の表面





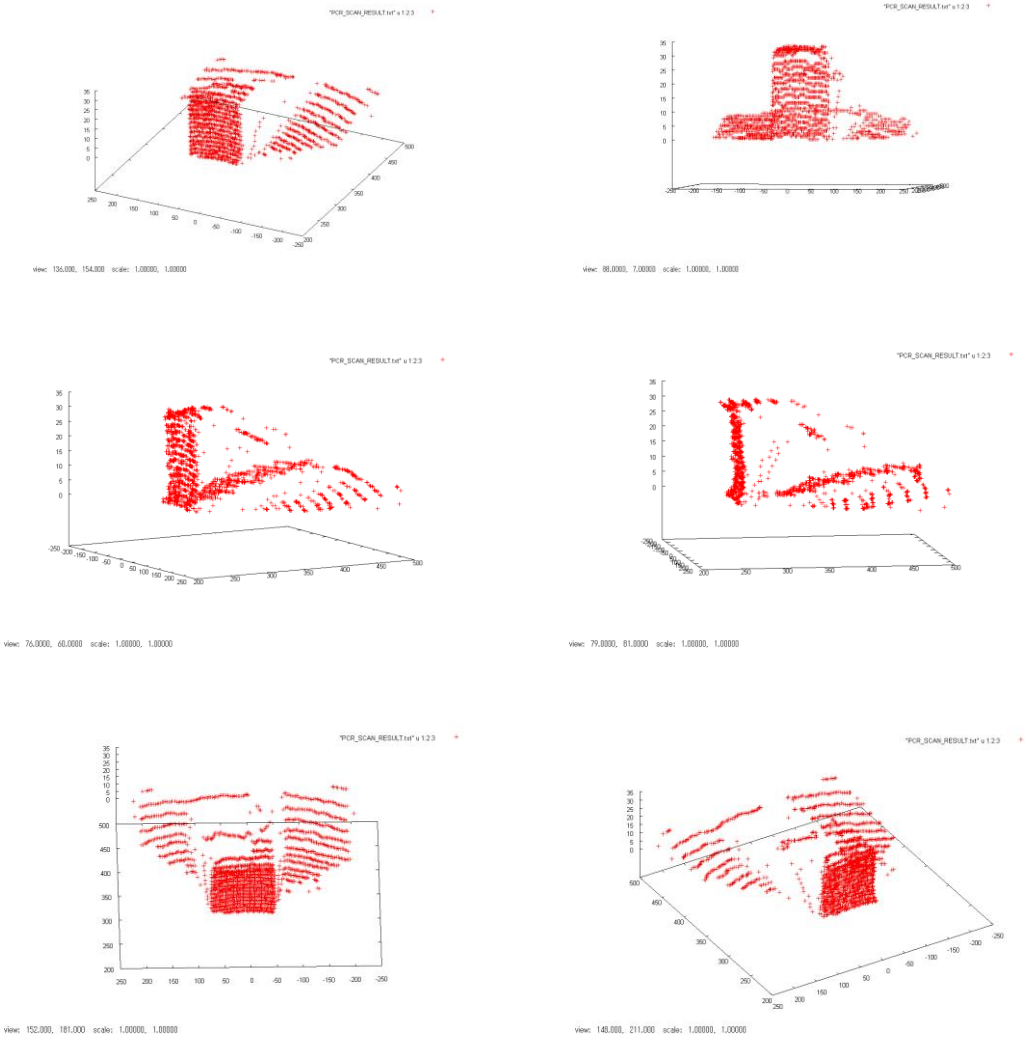
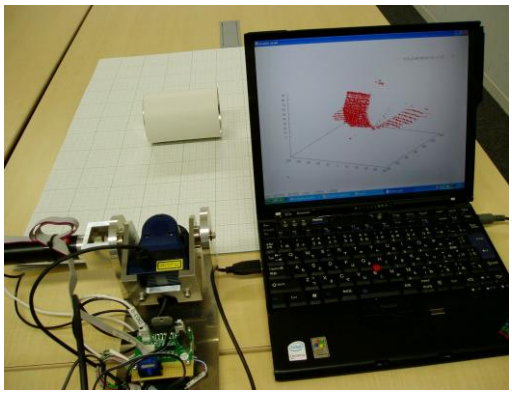


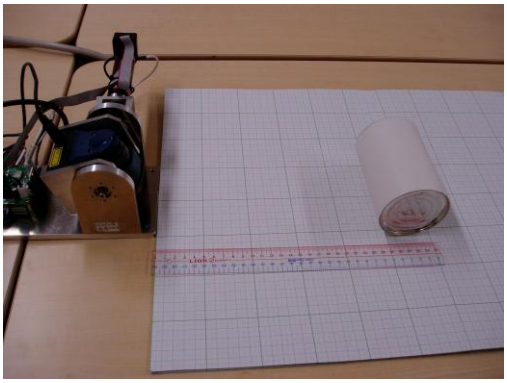
図 23. 紙で覆った木材の表面（単位：mm）

４－２．円柱状物体の画像

円柱状物体の画像（直径 85mm）

表面をコピー用紙で覆った円柱状物体の画像データを取得した。（単位：mm）





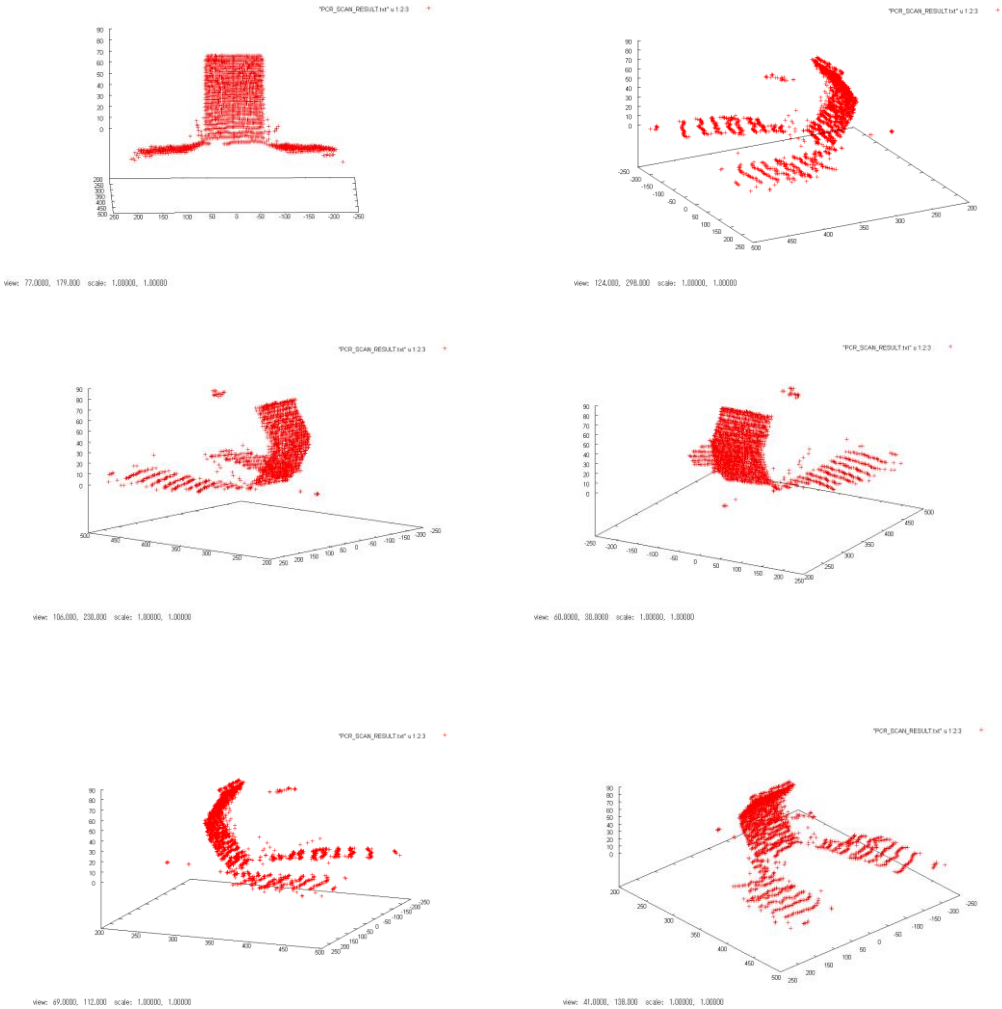
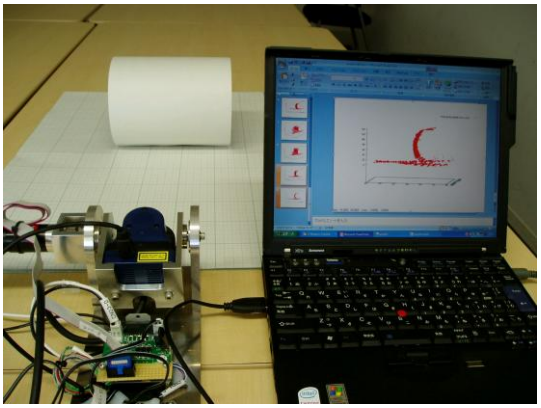


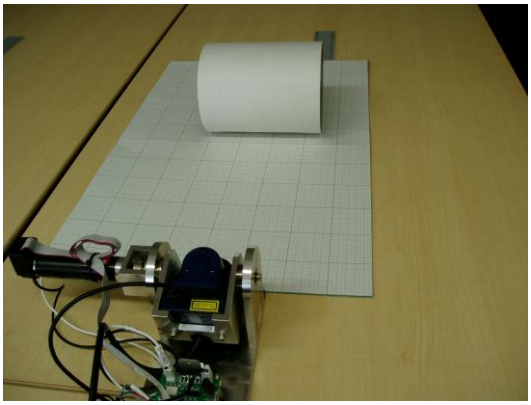
図 24. 円柱状物体の画像(1)（単位：mm）

円柱状物体の画像（直径 140mm）

表面をコピー用紙で覆った円柱状物体（直径 140mm）

（画像データの単位：mm）





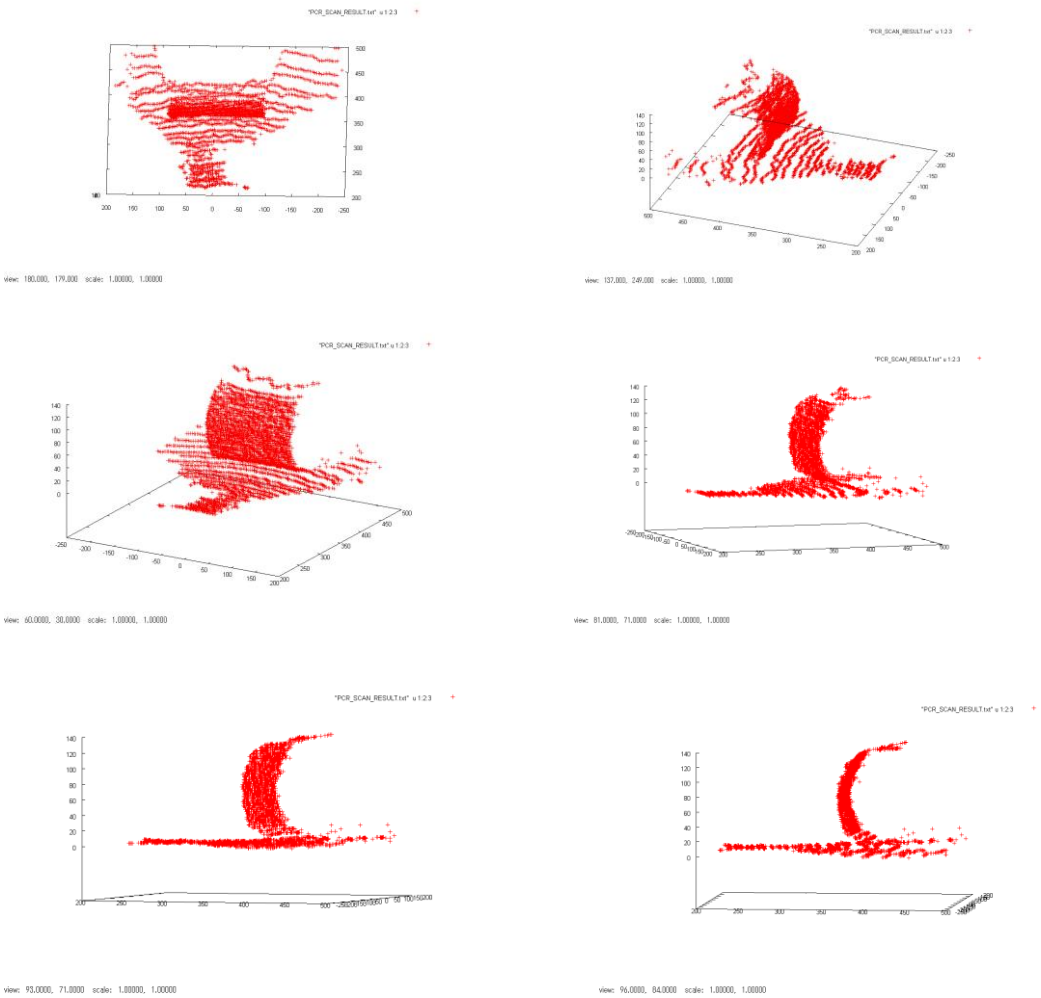
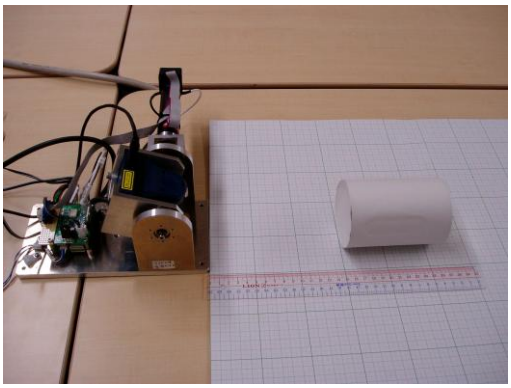
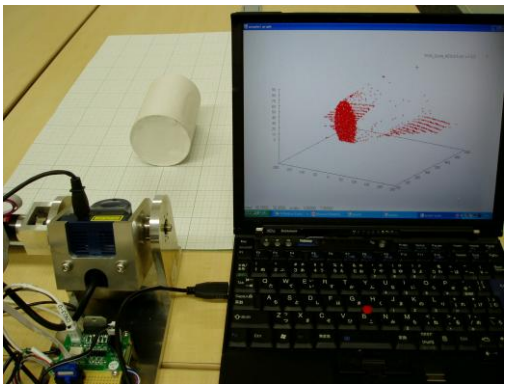


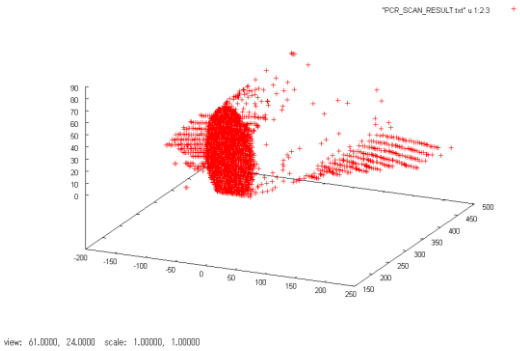
図 25. 円柱状物体の画像(2)（単位：mm）

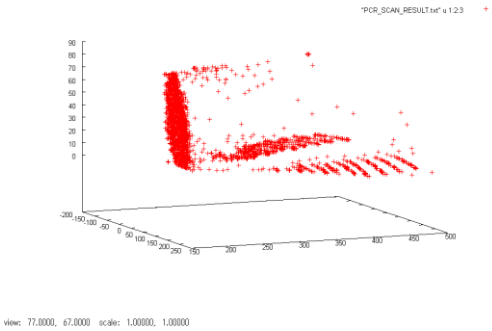
円柱状物体の直径面スキャン画像（直径 85mm）

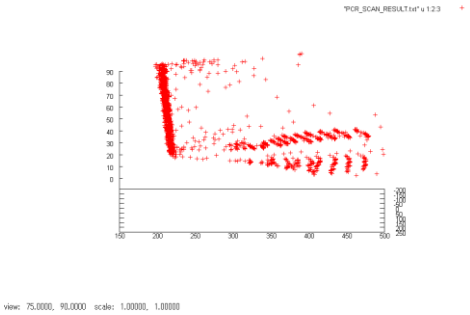
表面をコピー用紙で覆った円柱状物体　　（画像データの単位：mm）

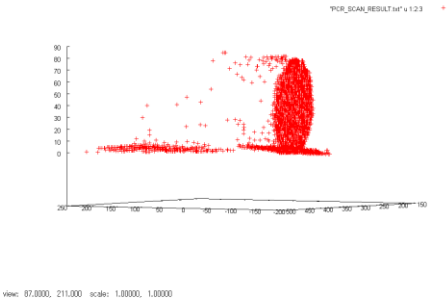


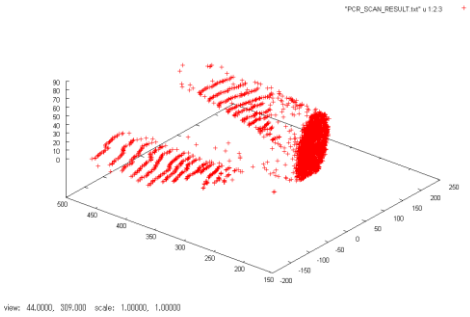


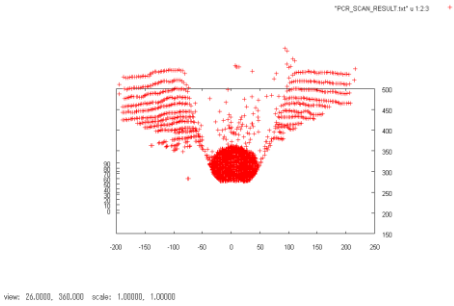












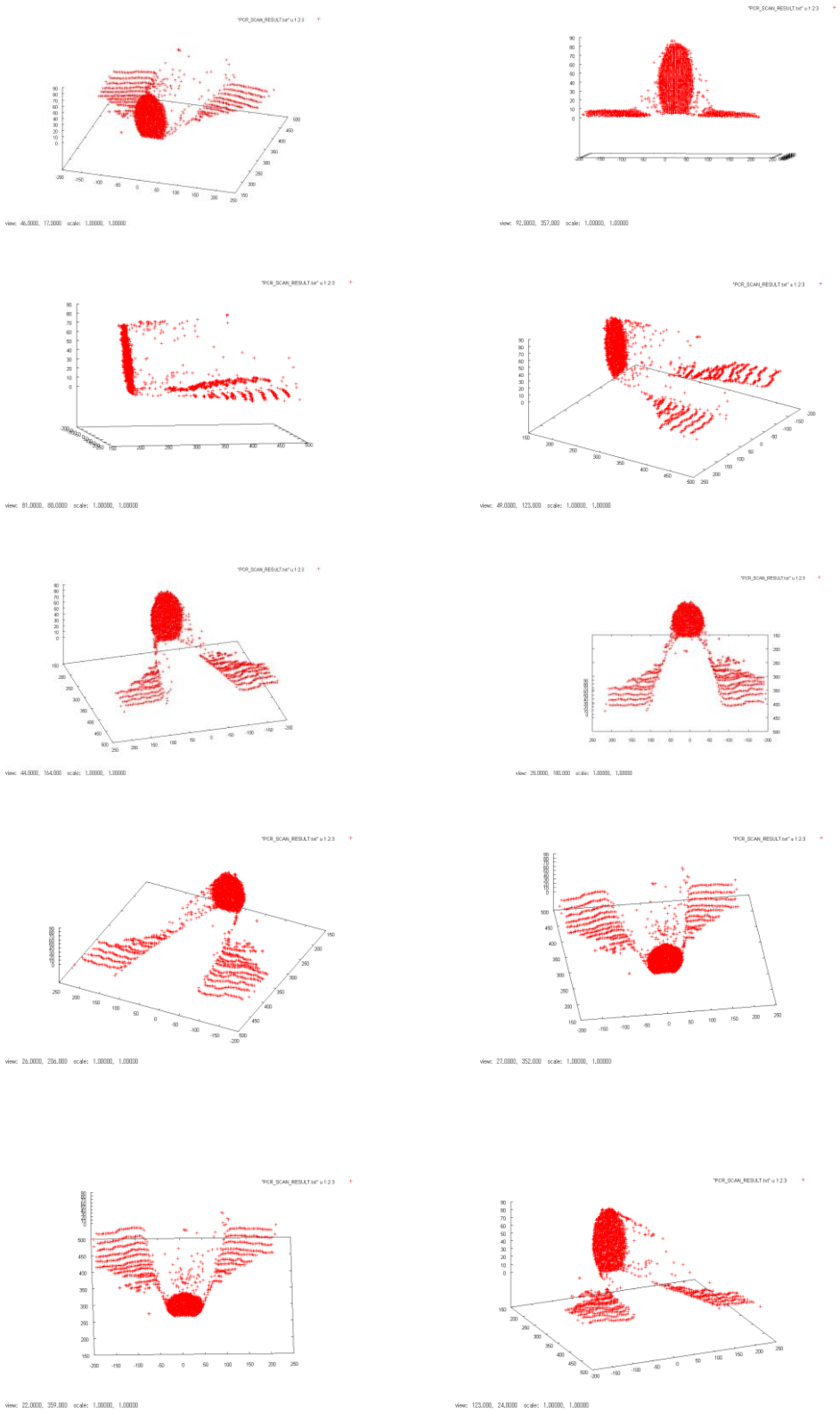


図 26. 円柱状物体の画像(3)（単位：mm）

第５章.　結論

５－１.　ロボットハンドへの取り付け

2010 年 1 月 6 日にスキャナ装置をロボットハンド部に取り付けた。
取り付け写真を図 27 に示す。

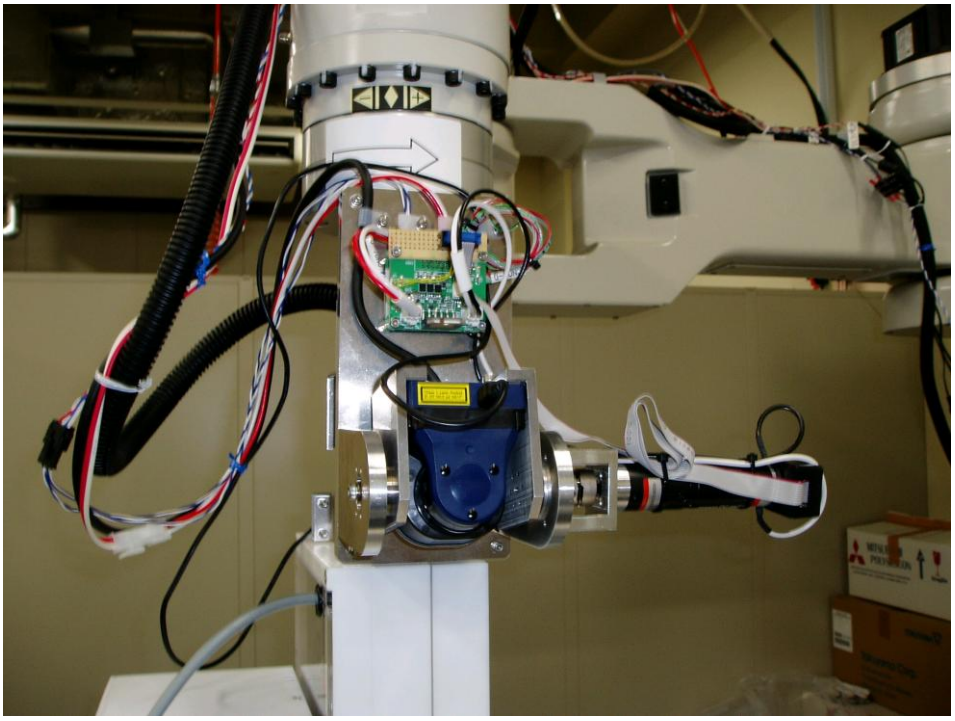


図 27. ロボットハンドにスキャナを取り付ける

５－２．　研究の成果

市販の２次元スキャナに上下動機構を付加し、３次元形状データ取得を可能にした。また、上下動角（エレベーション角）を高精度エンコーダで読み取り、デジタル信号を出力する組み込みコントローラを開発した。さらに、スキャナ信号およびエンコーダ出力から３Ｄ形状をデータに変換するソフトウェアを開発し、機能・性能を確認した。最後に種々の表面材質に対するデータを取得し、表面材質による測距性能を調べた。

５－３．　今後の課題

ロボットシステムのサブシステムとしての形状測定は次年度も引き継がれる。次年度の課題は２つある。まず、ロボットハンド機構とのインターフェース制作である。次に、容器の状態のチェックおよび衝突回避への適用である。スキャナ１台で、対象物と容器の両方をチェックすることになる。

人と一緒に働くロボットには明確な安全基準がない。一般的には、柵を設けて産業用ロボットと人を離してきた。本研究も同様の措置をとり、人が対象物をテーブルに置いて退室し、その後安全確認をしてからロボットが測定を開始するという手順を踏んでいる。2009 年 11 月の国際ロボット展で、ロボット 3 台が部品を手渡しながら、仕分け、取り付け、箱詰めの一連の作業を完成させるデモ展示があった。さらに今後は人と一緒に働く場合の安全性を視野に入れて、そのロボットの頭や背中にカメラやレーザーセンサを搭載して近づいてきた人との距離を計測するそうである。本研究のロボットシステムも同じ環境にあり、今後は一緒に働く人の動きをセンシングすることも課題になると思われる[(3)]。

参考文献

(1) 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,2009

(2) 山崎公俊：「カメラを搭載した移動ロボットによる画像列を用いた３次元形状モデリング」 筑波大学大学院システム情報工学研究科修士論文,2004

(3) 田中康晴：「進化続ける産業用ロボット」朝日新聞 2009.12.15 P33

(4) 狼嘉彰、冨田信之、中須賀真一、松永三郎：「宇宙ステーション入門」東京大学出版会,2002.P137～P162

(5) 広瀬茂男：「ロボット工学」裳華房,1987. P17～P33

(6) 岡本修：「フィードバック制御」＜講義用資料＞ エイム,2009. P3～P10

(7) 野波健蔵、西村秀和：「制御理論の基礎」東京電機大学出版局,2007.

(8) Matthew Daniel Lichter, Yoshiaki Ohkami：「Shape, Motion, and Parameter Estimation of Spacecraft and Structures Using Vision Sensors」JISTEC Report,2004

(9) 石井浩介、飯野謙次：「設計の科学 価値づくり設計」養賢堂,2008

(10) 榊原潤：「三次元流体計測」日本機械学会誌,2008.2 vol.111 No.1071

(11) 吉澤徹：「光三次元計測：この１年の回顧と展望」NPO(特定非営利活動法人)三次元工学会 第18回三次元工学シンポジウム資料集,2008.12

(12) 日本ロボット学会編「新版ロボット工学ハンドブック」コロナ社 2005 P17,P482～P483,P506～P509

(13) 加藤淳：「***制御PC/形状測定サブシステム制御PC間インターフェース仕様書」 慶應義塾大学大学院狼・浦郷研究室 2009.8.22 p1～p6

(14) 加藤淳：「***システム形状測定サブシステム制御PCソフトェア要求仕様書」 慶應義塾大学大学院狼・浦郷研究室 2009.8.22 p1～p12

(15) 北陽電機：「SCIP2.0準拠“URG”シリーズ通信仕様書」北陽電機2009

(16) 北陽電機：「測域センサUBG-04LX-F01(Rapid-URG)仕様書」北陽電機2009

謝辞

本研究は民間会社との共同研究です。工場での問題点を研究テーマに掲げることができ、現場の方々の有意義なご助言をいただくことができました。関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

小野電機株式会社の岩崎さま、森山さま、小野社長には、３次元スキャナ上下動装置の設計や作成、またロボットシステムの調整などに全面的なご協力をいただきました。度重なる実験設備の改良や、過って壊してしまった機器の再製作など、無理なお願いも快く応じて下さいました。

本研究は、システムデザイン・マネジメント研究科委員長の狼嘉彰教授のご指導のもとで行われたものです。狼先生は、委員長としてのお忙しい立場の中、工学的知識の乏しい私に対し、何度も個人的に基礎の講義をして下さいました。講義後の雑談はグローバルな知識をお持ちの先生の体験や見識を伺うことができ、講義よりも生き生きとしてしまい、先生をがっかりさせたものです。思うようなデータが出ないと嘆くと、「それが生のデータだ」と心に残るお言葉をいただきました。実験結果を大切にする姿を学ばせていただきました。

浦郷正隆准教授には、数学的解析法、実験の方法など全般的にご指導いただきました。浦郷先生は美しい数学を追及されます。大雑把な私は意味がわからないことも度々で、1 年次にご指導いただいた内容が２年次のある日突然理解できたことがありました。先生の困ったお顔が忘れられません。説明の時に書いて下さる絵が大変わかりやすく、理解しやすい指導に徹して下さいました。

岡本修教授は、実験機器を前にしながらフィードバック制御の講義をして下さいました。機器が故障するたび先生に電話で指示を仰ぎました。何度も駆けつけていただき、日暮れまで修理に立ち会って下さいました。

田中稔也さんは SDM 研究科の学生です。C 言語によるプログラム作成や、ロボットシステムとのインターフェースのソフトウェア開発など全面的にご協力をいただきました。初心者も理解できるプログラムを作成下さいました。

さらに大崎さんやロボットシステム関係者の方々、SDM 学生有志の方々には、実験の相談、プログラムの相談でご協力いただきました。狼先生はじめお世話になりました皆様に感謝申し上げます。ありがとうございました。

最後に私事ですが、夫急死後の家計を担う立場にありながら職を辞し学業に身を投じた私に対し、全面的に応援し励ましてくれた４人の子供たちに支えられての研究でした。若いみずみずしい感性で、実験手伝いやＣ言語の教授など、親子の立場が逆転する状況で本論文の完成に至ったことを報告いたします。

資料―１　測域センサ UBG-04Lx-F01 仕様

３．定格仕様

品　名	測域センサ
型　式	ＵＢＧ－０４ＬＸ－Ｆ０１
光　源	半導体レーザ　λ=785nm 、FDA レーザ安全クラス１ レーザーパワー：0.67mW 以下(ｽｷｬﾝﾆﾝｸﾞすることによってｸﾗｽ１に準拠)
電源電圧	DC 12V　±10%
消費電流	370mＡ以下　（但し、電源投入時は 700mＡ）
検出距離及び検出体	精度範囲：60～4,095mm 白ケント紙 80mm□以上 ＊
測距精度	製品添付ﾃﾞｰﾀに記載 （公称値 0.06～1m ： ±10mm＊ 、1～4m ： 距離の 1%＊）
測距分解能	1mm 単位
走査角度	240 度
角度分解能	約 0.36 度 （360°／1024 分割）
走査時間	28 ms／scan
ｲﾝﾀｰﾌｪｰｽ	RS-232C （19.2k、57.6k、115.2k、500k、750kbps） USB2.0(Full Speed) OUTPUT２点（同期出力・故障出力）
使用周囲温度、湿度	－10℃～＋50℃　85%ＲＨ以下 （但し、結露、凍結がない事）
保存温度	－25～75℃
外乱光	10000Lx 以下（太陽光）
耐 振 動	10～55Hz　複振幅 1.5mm　Ｘ．Ｙ．Ｚ方向　各２時間 55Hz～200Hz　98m/s²　スイープ２分　X,Y,Z 方向　各１時間
耐 衝 撃	196m/s²　Ｘ．Ｙ　Ｚ方向　各１０回
保護構造	IP40
絶縁抵抗	10MΩ　DC500V メガー
質　量	約 185g　　260g(ケーブル 1m 込み)
材　質	ケース前面部：ポリカーボネイト、ケース背面部：ＰＢＴ
外 形 寸 法 (W×D×H)	60×60×75mm 外形寸法図： MG-40-03150

注）＊ 基準環境下において

４．品質参考値

動作時の耐振動	10～150Hz　19.6m/s²　スイープ２分　X,Y,Z 方向　各 30 分
動作時の耐衝撃	49m/s²　X,Y,Z 方向　各 10 回
回転角速度	360 deg/s
回転加速度	π/2rad/s²
騒　音	25dB 以下（300mm にて）
品 質 規 格	FDA 認証（21 CFR part 1040.10 and 1040.11）　認証取得予定

名 称	UBG-04LX-F01　仕様	図 番	C－12－3539	3/6

HOKUYO AUTOMATIC CO.,LTD