

平成 20 年度
卒業研究報告

研究題目

ロボットティーチングのための 3 次元測位
システムの製作

指導教員

由井 四海

著者

板倉 史朗

平成 20 年 3 月 2 日提出

独立行政法人国立高等専門学校機構

富山商船高等専門学校 電子制御工学科

目次

1. 序論.....	1
1.1 はじめに.....	1
1.2 目的.....	1
2. マニピュレータ.....	1
3. 小型測位システムの製作.....	2
3.1 ロータリーエンコーダ.....	2
3.2 PIC18F2550 使用 USB マイコンボード.....	4
3.3 NI USB-6509.....	5
3.4 小型測位システムの構築.....	7
4. インクリメンタル形ロータリーエンコーダの回転方向判別.....	9
5. PICkit 2.....	10
6. USB ポート.....	11
7. デジタル I/O インターフェース.....	14
8. LabVIEW での 3 次元座標の導出.....	18
9. まとめ.....	32
10. 付録.....	33
10.1 プログラムリスト 1.....	33
10.2 プログラムリスト 2.....	38
10.3 ピン対応.....	41
11. 参考文献.....	43
12. 謝辞.....	43

1. 序論

1.1 はじめに

現在、ロボットを教示するために、CAD/CAM(Computer Aided Design/Computer Aided Engineering)が広く使われている。ロボットに作業を実現させるためには、ロボットに動作を詳細に教示してやらなければならない。その教示内容は汎用性に乏しく、条件が変わると再教示が必要となる。また、コンピュータを使用したことのない初心者が CAD/CAM を使用して、ロボットを教示するのは難しいため、コンピュータの使い方から学ばなければいけない。

1.2 目的

初心者がロボットを教示するには、ロボットの小型測位システムを使用して、ロボットにどのように動けばいいか教える方が簡単である。そこで、6軸マニピュレータの小型測位システムを作製する。そして、先端の3次元座標がパソコン上の画面に出力される物を作製することを目的とする。

2. マニピュレータ

マニピュレータとは、人間の腕のように、関節とリンク(腕)が組み合わされてできあがった構造のロボットである。マニピュレータは、現在利用されているロボットの中で最も一般的な形態である。中でも工場内で組立作業、溶接作業などに用いることを想定して販売されている物は産業用ロボットと呼ばれている。図2.1に6軸マニピュレータの実物を示す。図2.2にモデル化した物を示す。



図2.1 安川電機 MOTOMAN-HP5
(YR-HP5-A00)

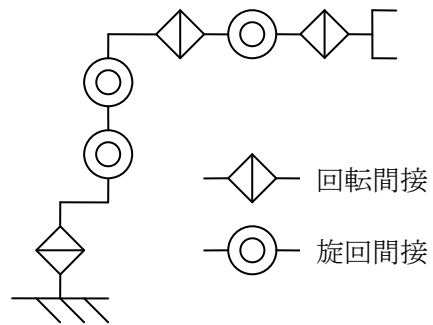


図2.2 6軸マニピュレータのモデル

3. 小型測位システムの製作

3.1 ロータリーエンコーダ

ロータリーエンコーダとは、回転角を測定するエンコーダである。ロータリーエンコーダには、アブソリュート形ロータリーエンコーダとインクリメンタル形ロータリーエンコーダが存在する。アブソリュート形ロータリーエンコーダの特徴を以下に示す。

- ・ 角度位置に対応したコード信号を出力
- ・ 回転軸の絶対的な位置を測定

インクリメンタル形ロータリーエンコーダの特徴を以下に示す。

- ・ 軸の回転変位量に応じてパルスを出力
- ・ 回転軸の相対的な位置を測定
- ・ 分解能が高い

図 3.1 にインクリメンタル形ロータリーエンコーダを示す。本研究では、小型測位システムの間接の角度を測定するために、OMRON 社製のインクリメンタル形ロータリーエンコーダを使用した。表 3.1 にインクリメンタル形ロータリーエンコーダの仕様を示す。



図 3.1 インクリメンタル形ロータリーエンコーダ

表 3.1 インクリメンタル形ロータリーエンコーダ

型式	E6J-CWZ1E
電源電圧	DC5V \pm 5%(リップル含む)
消費電流	40mA
出力相	A 相・B 相・Z 相(負論理)
出力形態	電圧出力
応答周波数	100kHz 以下
A/B 相位相差	90 \pm 45 $^{\circ}$
出力容量	出力抵抗: 2.2k Ω 残留電圧: 0.5V 以下 出力電流: 20mA
立上り/立下り時間	2 μ s
起動トルク	1mN \cdot m 以下
慣性モーメント	0.045 \times 10 $^{-7}$ kg \cdot m 2
許容最高回転数	6000 r/min
許容軸負荷荷重	ラジアル方向 1.9N/スラスト方向 1.9N

3.2 PIC18F2550 使用 USB マイコンボード

本研究では、USB ポートを搭載している秋月電子通信社製の PIC18F2550 使用 USB マイコンボードを使用した。図 3.2 にマイコンボードの回路を示す。以下に特徴を示す。

- 基板に USB マイコン PIC18F2550、USB-mini コネクタを搭載
- 基板サイズ 40mm×18mm で、28 ピン IC ソケットに装着可能
- 20MHz クリスタルを搭載して、内部 PLL で 48MHz で高速動作
- 電源は、USB からのバスパワー、外部からの 5V 電源、基板搭載の 5V レギュレータ使用の 3 タイプの方式に対応
- ソフト開発は、マイクロチップ社無償版 C18 コンパイラ(StudentEdition)が使用可能
- ソフト書き込みは、AKI-PIC プログラマ Ver4 に対応

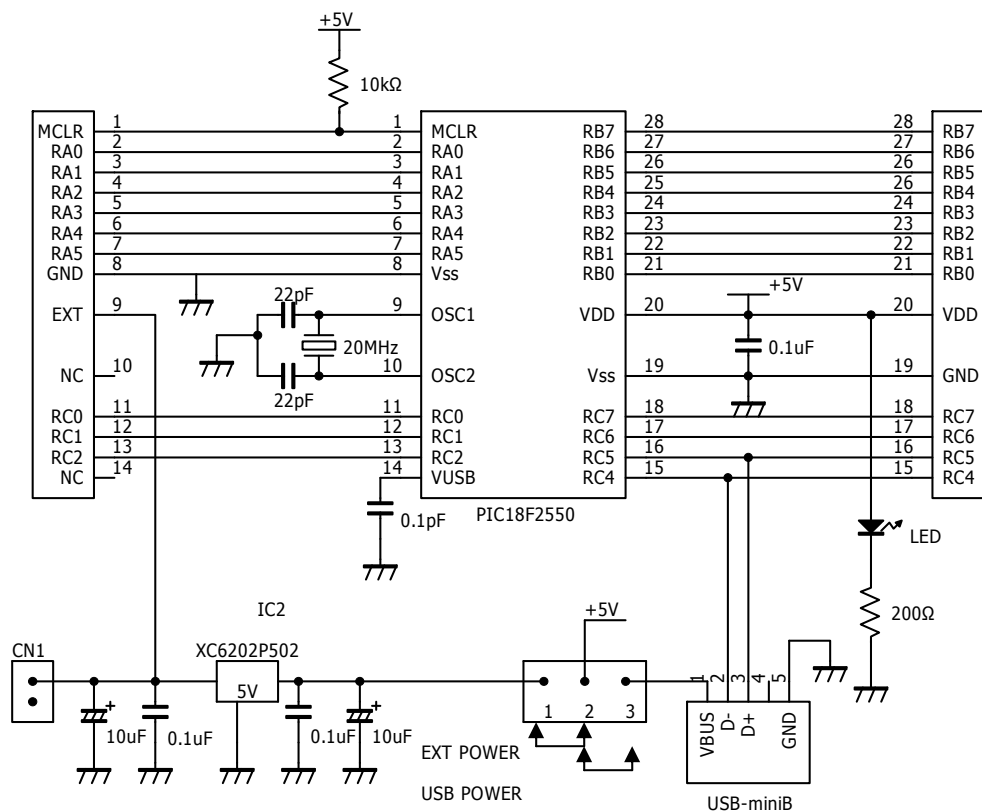


図 3.2 マイコンボードの回路

3.3 デジタル I/O インターフェース

本研究では、6 個マイコンボードからのデータをパソコンに送信するために、96 チャンネルあるデジタル I/O インターフェース(NI USB-6509)を使用した。図 3.3 にデジタル I/O インターフェースを示す。表 3.2 にデジタル I/O インターフェースの仕様を示す。



図 3.3 デジタル I/O インターフェース

表 3.2 デジタル I/O インターフェース

一般仕様	
型式	NI USB-6509
フォームファクタ	USB
計測タイプ	デジタル
長さ	17.78 cm
幅	10.30 cm
高さ	3.34 cm
I/O コネクタ	0.050 D タイプ 100 ピン(メス)
デジタル I/O	
チャンネル数	96 DIO
最大入力範囲	0..5 V
最大出力範囲	0..5 V
入力電流	シンク、ソース
出力電流	シンク、ソース
電流ドライブ(チャンネル/合計)	24 mA/1.5 A

3.4 小型測位システムの製作

図 3.4 に製作した小型測位システム(5 分の 1 スケール)を示す。図 3.5 に小型測位システムの寸法と座標系を示す。

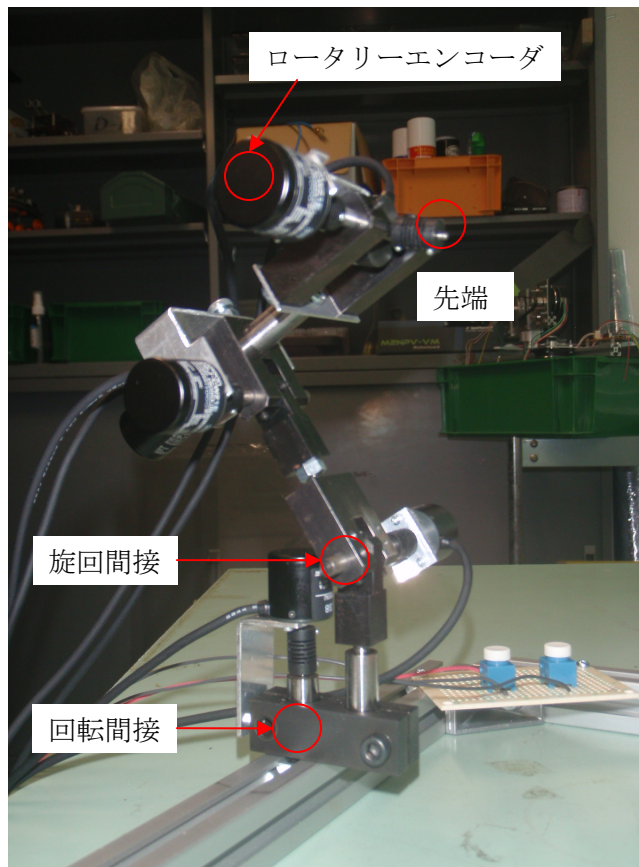


図 3.4 小型測位システム

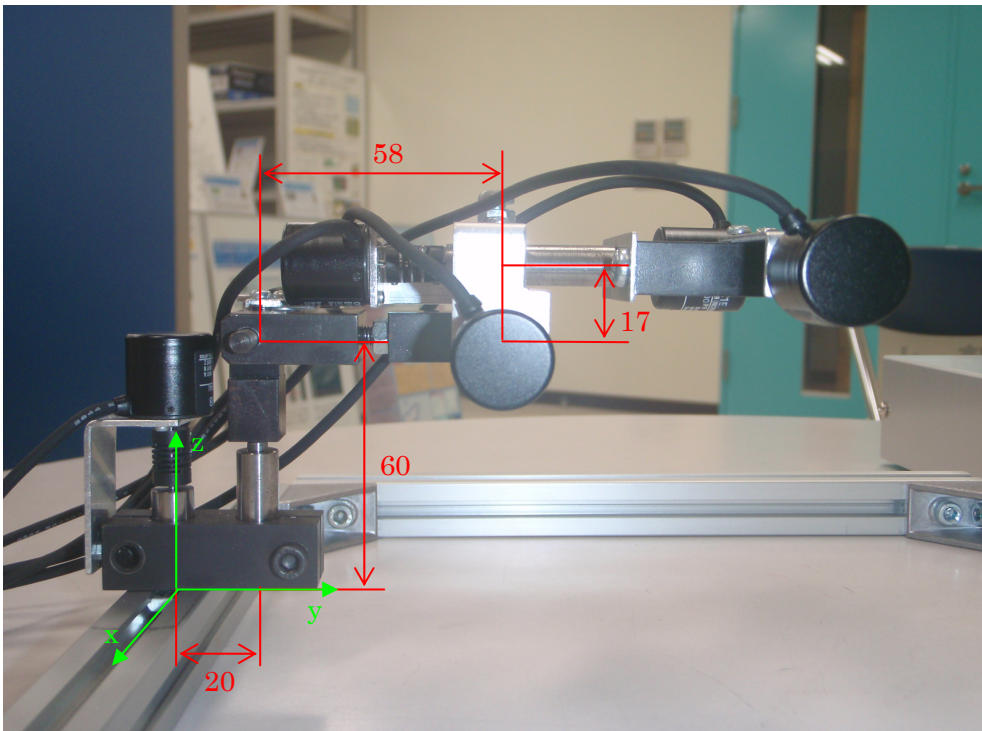
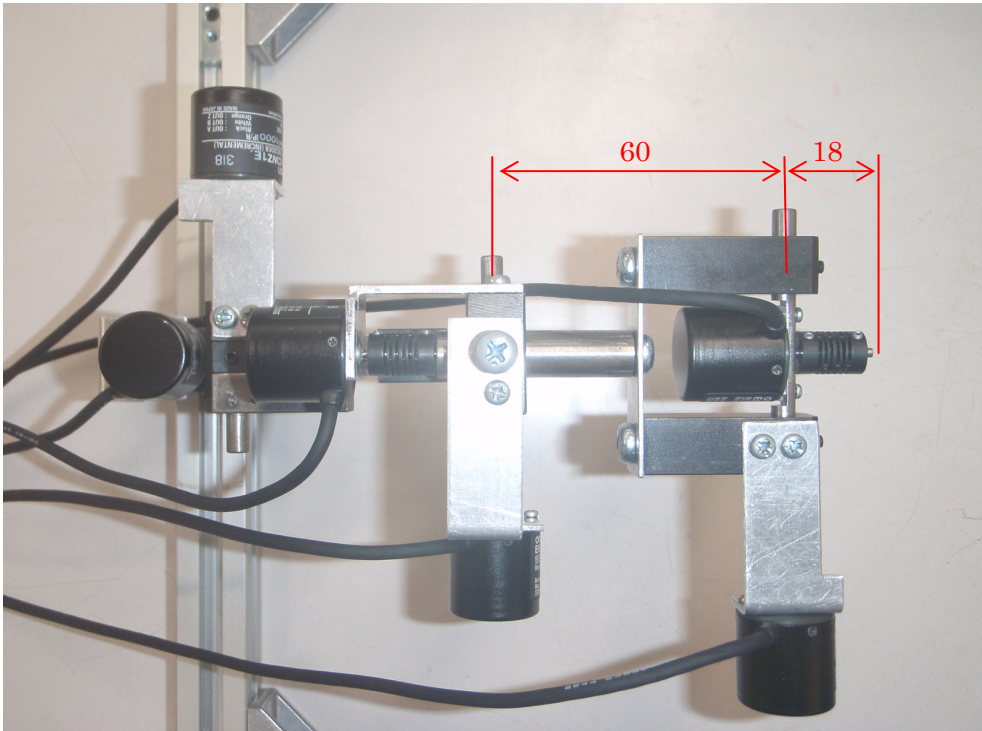


図 3.5 小型測位システムの寸法と座標系

4. インクリメンタル形ロータリーエンコーダの回転方向判別

図 4.1 にインクリメンタル形ロータリーエンコーダの出力波形を示す。出力波形には A 相、B 相がある。エンコーダを軸側から見て時計回り (cw) に回転させたときに、図 4.1 のように 2 つの信号が出力される。A 相のパルスが先に出て、半パルスだけ遅れて B 相のパルスが出力される。また、反時計回りに回転させると A 相、B 相の信号は、先に B 相のパルスが出てから A 相が出力される。この関係を利用して回転方向を判別する。

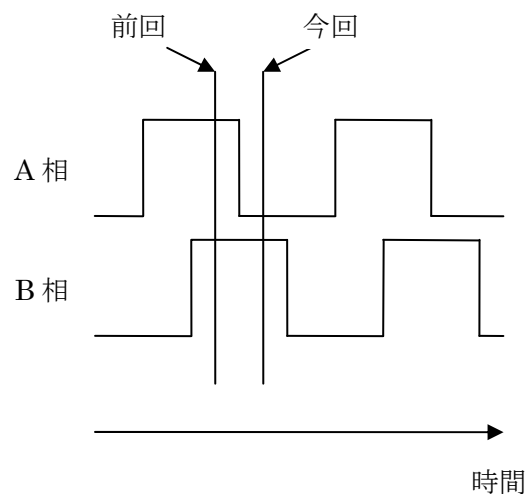


図 4.1 出力波形(CW の場合)

インクリメンタル形ロータリーエンコーダの回転方向の判別は、図 4.2 に示したフローチャートより判別することができる。例えば、図 4.1 の前回と今回の A 相、B 相を見ると、前回の B 相は high、今回の A 相は low となるのでフローチャートより時計回りということがわかる。

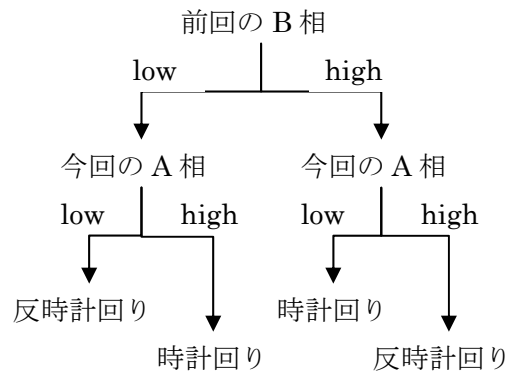


図 4.2 フローチャート

5. PICKit 2

マイコンボードにプログラムを書き込むために、MICROCHIP 社製の PICKit 2 を使用した。図 5.1 にプログラムを書き込むために製作した回路を示す。以下に特徴を示す。

- ・ インサーキット書き込みでユーザー基盤に直接書き込み可能
- ・ USB インターフェースによる書き込み器装備
- ・ 専用プログラマ(MPLAB とは別)
- ・ 独立な書き込み器としても使用可能
- ・ 電源は USB 供給可能
- ・ PIC16・PIC18・PIC24・dsPIC30F・dsPIC33F など多くのデバイスをサポート
- ・ モジュラ変換コネクタで MPLAB ICD 2 コネクタにダイレクトイン
- ・ MAL のほとんどのボードに対応

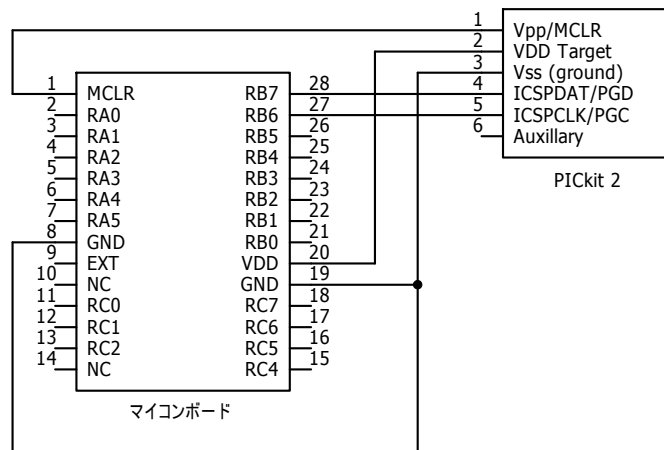


図 5.1 回路構成

6. USB ポート

6 個のマイコンボードの USB ポートを使用して、パソコンにカウントの値を送信した。プログラムの開発環境は MPLAB C18 を使用した。プログラムの内容は、カウントを作成して、4 節の図 4.2 を基に A 相、B 相それぞれの立上り、立下りを数え、反時計回りのときに 1 増加、時計回りのときに 1 減少し、Z 相が low のときにカウントがリセットされるようにした。パソコンから信号を受信したとき、カウントの値をパソコンに送信した。そして、インクリメンタル形ロータリーエンコーダは相対的な位置を測定するため、Z 相が初めて low になったときに LED が点灯するようにした。立上り、立下りを数えることにより、分解能は 4000 となる。図 6.1 にマイコンボードとパソコン間のポンチ図を示す。図 6.2 マイコンボードの回路構成を示す。プログラムを付録のプログラムリスト 1 に示す。図 6.3 にプログラムの簡単なフローチャートを示す。

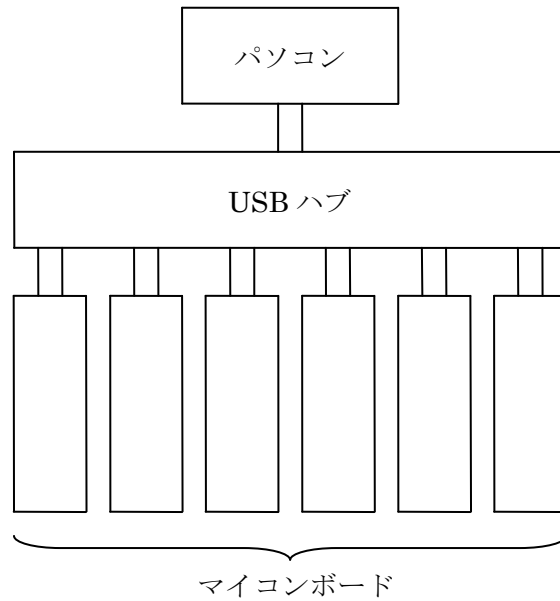


図 6.1 ポンチ図

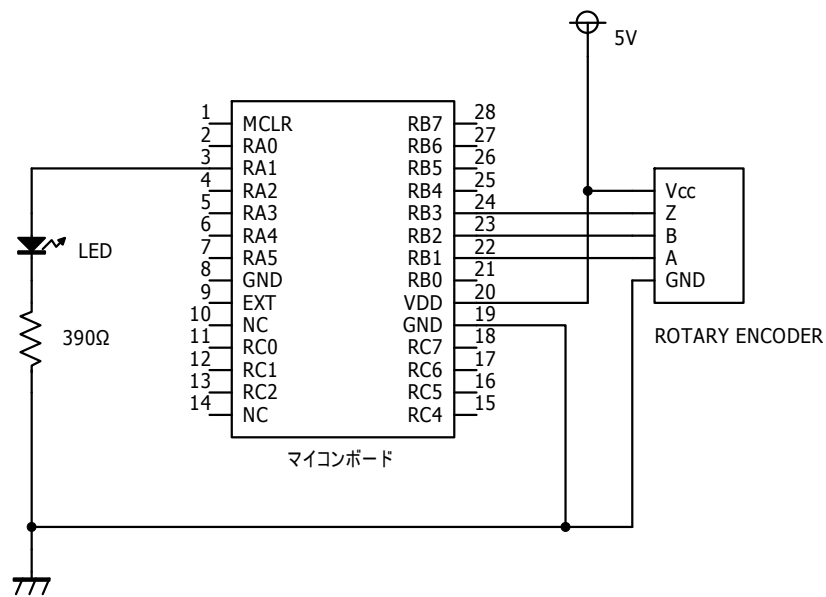


図 6.2 回路構成

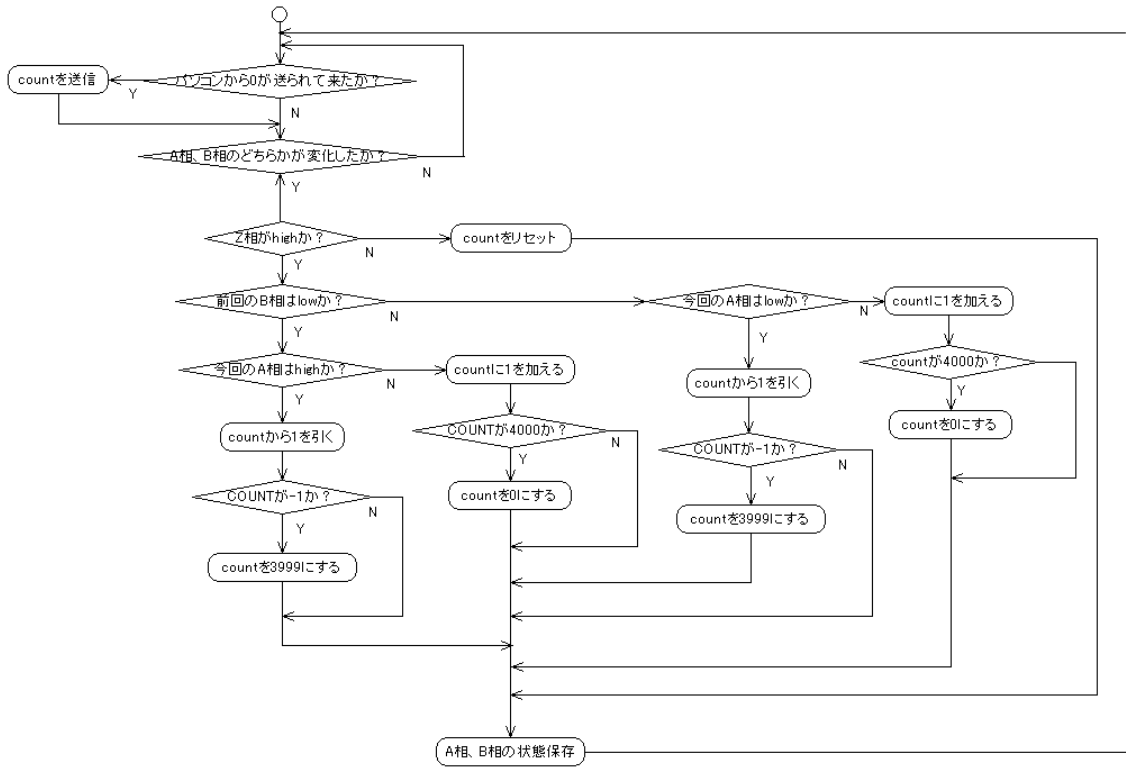


図 6.3 フローチャート

7. デジタル I/O インターフェース

6 節の USB ポートを使用した方法は、パソコンとの通信中にエンコーダを動かしてしまうとパルスのカウントミスが生じる。デジタル I/O インターフェースは値を読み取るので、リアルタイムに値を送信することができる。

6 個のマイコンボードの出力ポートとデジタル I/O インターフェース(NI USB-6509)を使用して、パソコンにカウントの値をパソコンに送信した。プログラムの内容は、カウントの値を出力ポートを介して、12bit の 2 進数で出力した。図 7.1 にマイコンボードとパソコン間のポンチ図を示す。図 7.2 にマイコンボードの回路構成を示す。図 7.3 に実験の全体図を示す。図 7.4 と表 7.1 にエンコーダとデジタル I/O インターフェースのピン対応を示す。プログラムを付録のプログラムリスト 2 に示す。図 7.5 にプログラムの簡単なフローチャートを示す。デジタル I/O インターフェースのピン対応を付録のピン対応に示す。

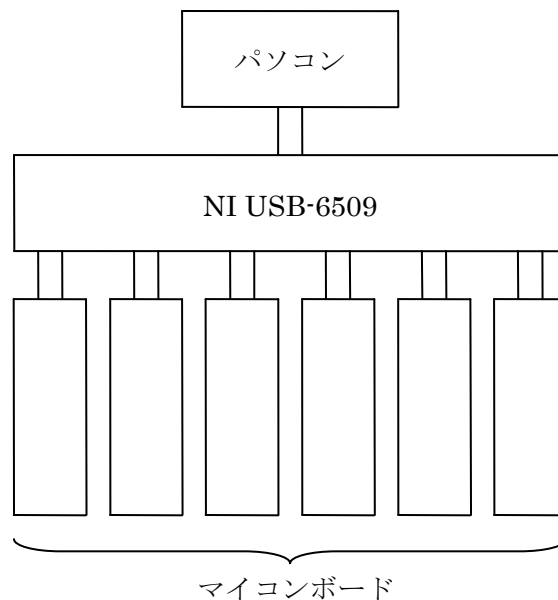


図 7.1 ポンチ図

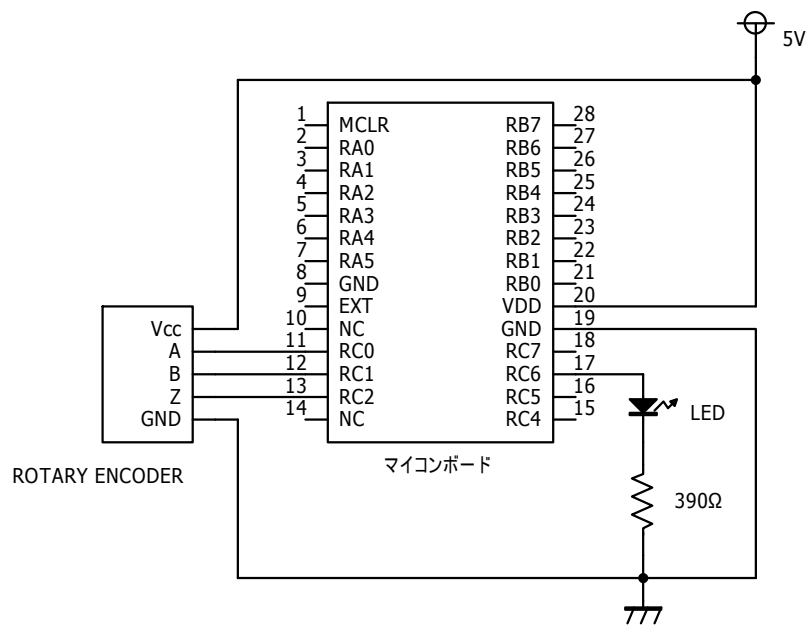


図 7.2 回路構成

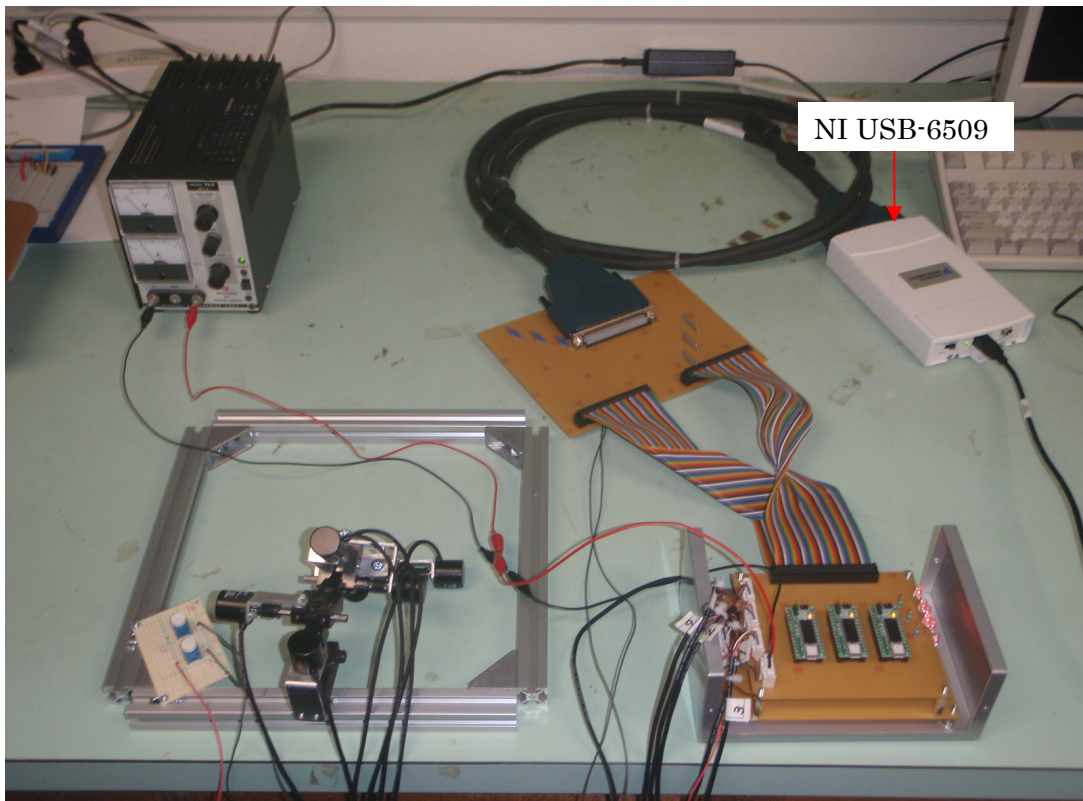


図 7.3 回路構成

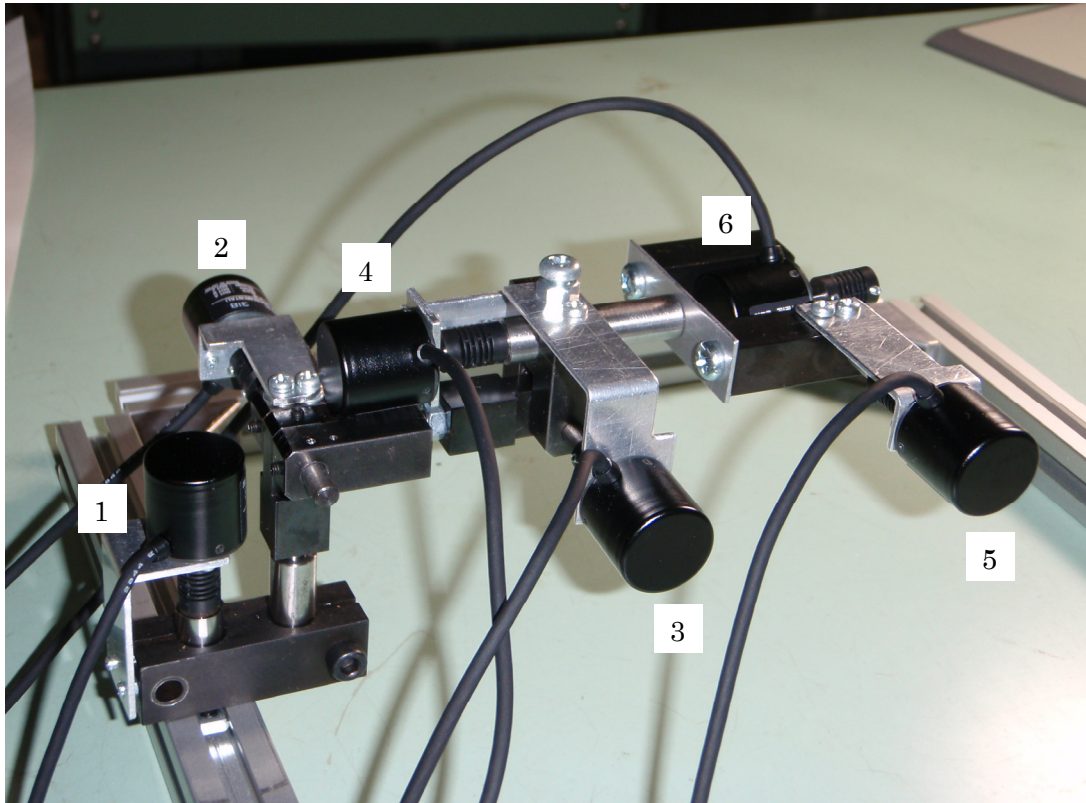


図 7.4 ピン対応

表 7.1 ピン対応

1	ピン番号	2	ピン番号	3	ピン番号
RA1(下位)	47(P0.0)	RA1(下位)	31(P1.0)	RA1(下位)	15(P2.0)
RA2	45(P0.1)	RA2	29(P1.1)	RA2	13(P2.1)
RA3	43(P0.2)	RA3	27(P1.2)	RA3	11(P2.2)
RA4	41(P0.3)	RA4	25(P1.3)	RA4	9(P2.3)
RA5	39(P0.4)	RA5	23(P1.4)	RA5	7(P2.4)
RB1	37(P0.5)	RB1	21(P1.5)	RB1	5(P2.5)
RB2	35(P0.6)	RB2	19(P1.6)	RB2	3(P2.6)
RB3	33(P0.7)	RB3	17(P1.7)	RB3	1(P2.7)
RB4	48(P3.0)	RB4	32(P4.0)	RB4	16(P5.0)
RB5	46(P3.1)	RB5	30(P4.1)	RB5	14(P5.1)
RB6	44(P3.2)	RB6	28(P4.2)	RB6	12(P5.2)
RB7(上位)	42(P3.3)	RB7(上位)	26(P4.3)	RB7(上位)	10(P5.3)
4	ピン番号	5	ピン番号	6	ピン番号
RA1(下位)	97(P6.0)	RA1(下位)	81(P7.0)	RA1(下位)	65(P8.0)
RA2	95(P6.1)	RA2	79(P7.1)	RA2	63(P8.1)
RA3	93(P6.2)	RA3	77(P7.2)	RA3	61(P8.2)
RA4	91(P6.3)	RA4	75(P7.3)	RA4	59(P8.3)
RA5	89(P6.4)	RA5	73(P7.4)	RA5	57(P8.4)
RB1	87(P6.5)	RB1	71(P7.5)	RB1	55(P8.5)
RB2	85(P6.6)	RB2	69(P7.6)	RB2	53(P8.6)
RB3	83(P6.7)	RB3	67(P7.7)	RB3	51(P8.7)
RB4	98(P9.0)	RB4	82(P10.0)	RB4	66(P11.0)
RB5	96(P9.1)	RB5	80(P10.1)	RB5	64(P11.1)
RB6	94(P9.2)	RB6	78(P10.2)	RB6	62(P11.2)
RB7(上位)	92(P9.3)	RB7(上位)	76(P10.3)	RB7(上位)	60(P11.3)

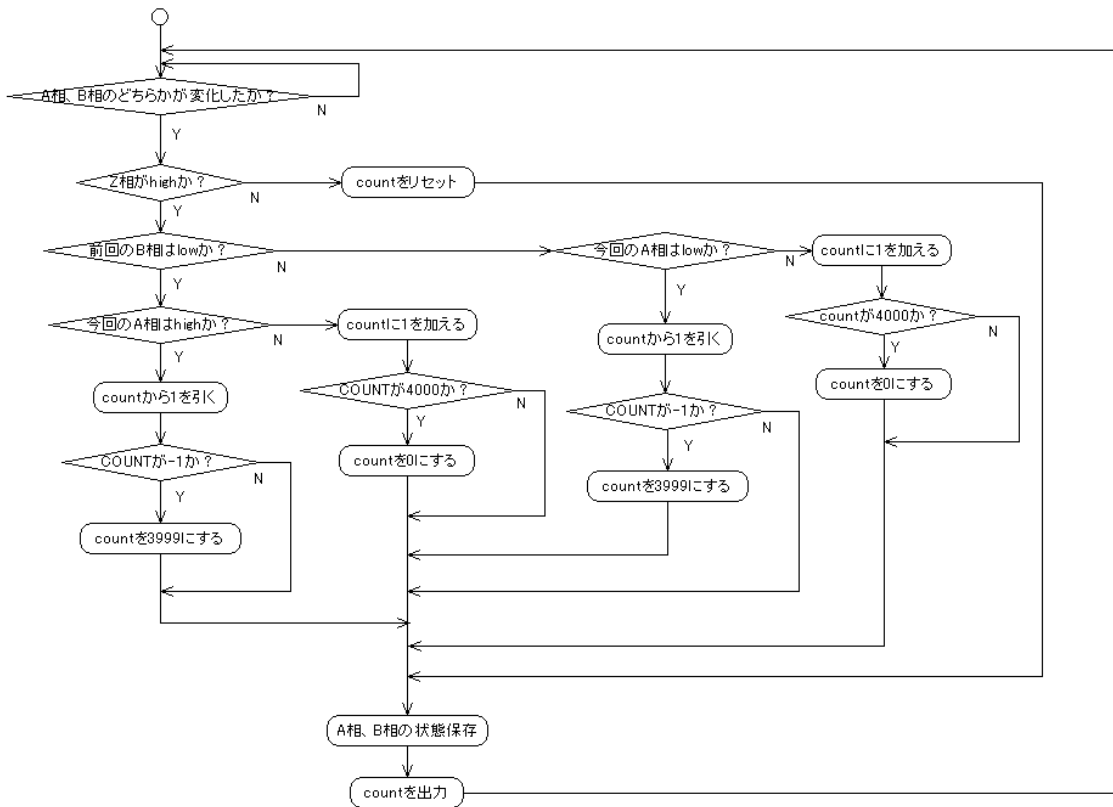


図 7.5 フローチャート

8. LabVIEW での 3 次元座標の導出

3 次元座標の導出

小型測位システムの 3 次元座標を LabVIEW を使用して導出した。まず、PIC から送られて来たカウントの値を基に、間接の回転角度を導出した。そして、リンクの長さと同回転角度から 7 点の 3 次元座標を導出した。点 0 は原点である。図 8.1 に、7 点の位置を示す。図 8.2 に LabVIEW の実行画面を示す。

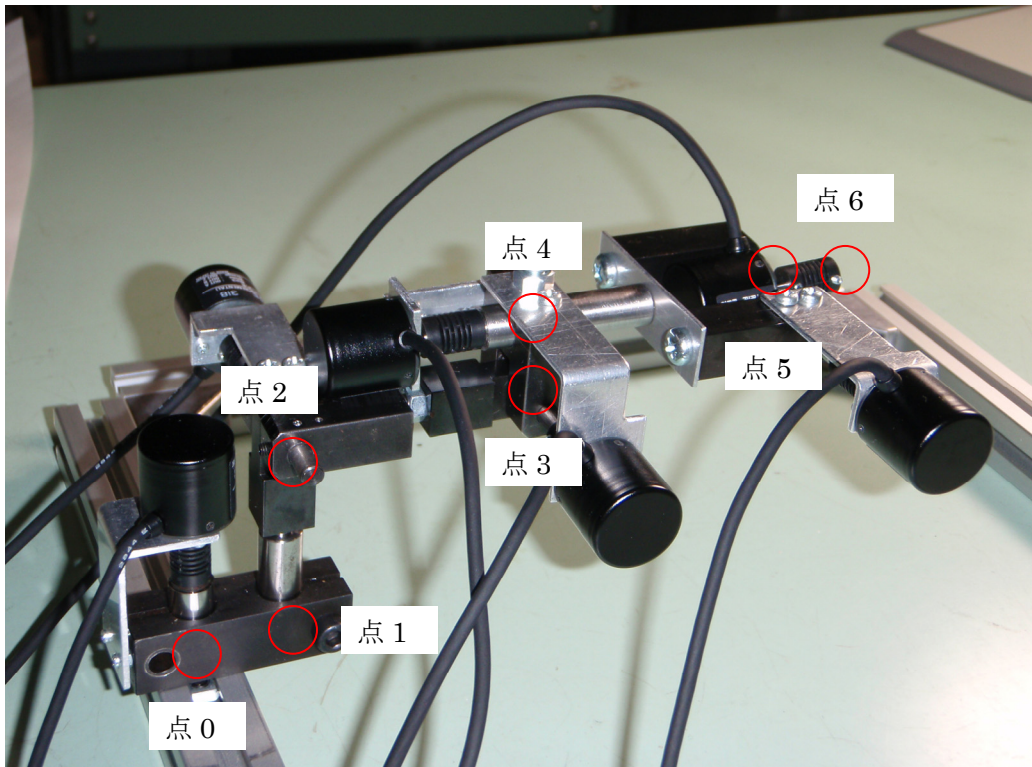


図 8.1 小型測位システムの導出点

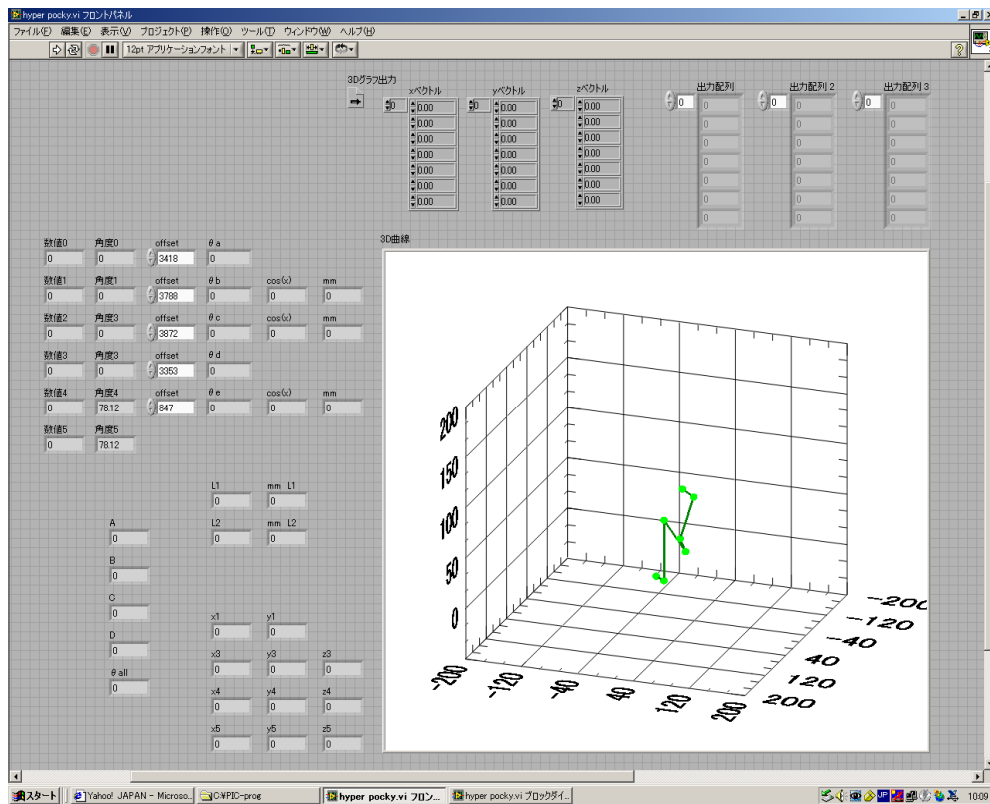


図 8.2 LabVIEW の実行画面

点 1 の導出

図 8.3 に示す基準位置を考える。よって、点 1 の座標は、

$$x_1 = 20 \cos \theta_a$$

$$y_1 = 20 \sin \theta_a$$

$$z_1 = 0$$

となる。

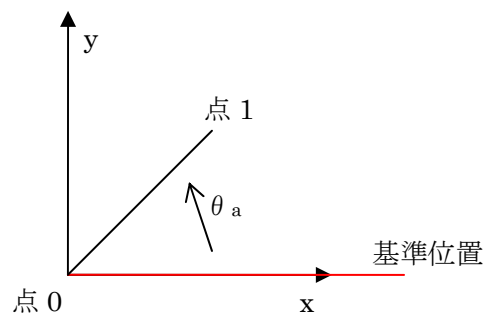


図 8.3 点 1 導出の基準位置(上面図)

点 2 の導出

点 1 の座標から z 軸方向に垂直に 60 移動した点なので、

$$x_2 = 20 \cos \theta_a$$

$$y_2 = 20 \sin \theta_a$$

$$z_2 = 60$$

となる。

点 3 の導出

図 8.4 に示す基準位置を考える。点 0 と点 3 から xy 平面に垂直に下ろした点 P の距離は、

$$P = 58 \cos \theta_a + 20$$

となる。よって、点 3 の座標は

$$\begin{aligned}
 x_3 &= (58 \cos \theta_b + 20) \cos \theta_a \\
 y_3 &= (58 \cos \theta_b + 20) \sin \theta_a \\
 z_3 &= 60 - 58 \cos \theta_b
 \end{aligned}$$

となる。

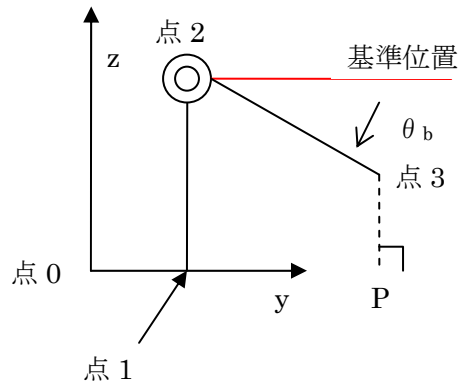


図 8.4 点 3 の導出(側面図)

点 4 の導出

図 8.5(a)に示す基準位置を考える。図 8.5(b)の角度 A は

$$A = \pi - \theta_c$$

となる。余弦定理より、 L_1 は

$$\begin{aligned}
 L_1 &= \sqrt{58^2 + 17^2 - 2 \times 58 \times 17 \cos A} \\
 &= \sqrt{3653 + 1972 \cos \theta_c}
 \end{aligned}$$

となり、角度 B は

$$\begin{aligned}
 B &= \cos^{-1} \left(\frac{58^2 + L_1^2 - 17^2}{2 \times 58 \times L_1} \right) \\
 &= \cos^{-1} \left(\frac{58 + 17 \cos \theta_c}{\sqrt{3653 + 1972 \cos \theta_c}} \right)
 \end{aligned}$$

となる。点 0 と点 4 から xy 平面に垂直に下ろした点 Q の距離は、

$$Q = \sqrt{3653 + 1972 \cos \theta_c} \cos \left\{ \theta_b + \cos^{-1} \left(\frac{58 + 17 \cos \theta_c}{\sqrt{3653 + 1972 \cos \theta_c}} \right) \right\} + 20$$

となる。よって、点4の座標は

$$x_4 = \left[\sqrt{3653 + 1972 \cos \theta_c} \cos \left\{ \theta_b + \cos^{-1} \left(\frac{58 + 17 \cos \theta_c}{\sqrt{3653 + 1972 \cos \theta_c}} \right) \right\} + 20 \right] \cos \theta_a$$

$$y_4 = \left[\sqrt{3653 + 1972 \cos \theta_c} \cos \left\{ \theta_b + \cos^{-1} \left(\frac{58 + 17 \cos \theta_c}{\sqrt{3653 + 1972 \cos \theta_c}} \right) \right\} + 20 \right] \sin \theta_a$$

$$z_4 = 60 - \sqrt{3653 + 1972 \cos \theta_c} \sin \left\{ \theta_b + \cos^{-1} \left(\frac{58 + 17 \cos \theta_c}{\sqrt{3653 + 1972 \cos \theta_c}} \right) \right\}$$

となる。

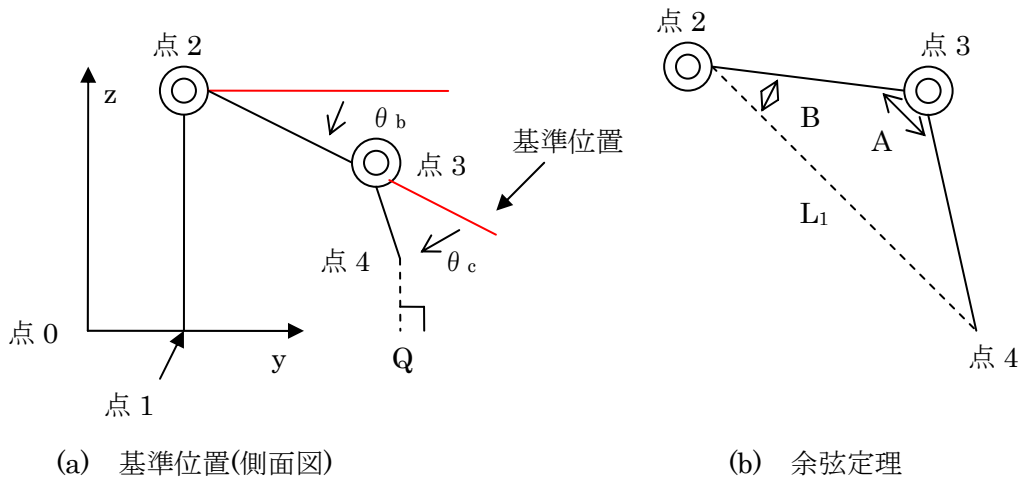


図 8.5 点4の導出

点5の導出

図 8.6(b)に示す点3と点5を結んだ線分を考える。角度Cは

$$\begin{aligned} C &= \pi - \left\{ \theta_c + \tan^{-1} \left(\frac{60}{17} \right) \right\} \\ &= \pi - (\theta_c + 1.29) \end{aligned}$$

となる。余弦定理より、 L_2 は

$$L_2 = \sqrt{58^2 + \left(\sqrt{17^2 + 60^2}\right)^2 - 2 \times 58 \times \sqrt{17^2 + 60^2} \cos C}$$

$$= \sqrt{7253 + 7234 \cos(\theta_c + 1.29)}$$

となり、角度 D は

$$D = \cos^{-1} \left\{ \frac{58^2 + L_2^2 - \left(\sqrt{17^2 + 60^2}\right)^2}{2 \times 58 \times L_2} \right\}$$

$$= \cos^{-1} \left\{ \frac{58 - 62.4 \cos(\theta_c + 1.29)}{\sqrt{7253 + 7233 \cos(\theta_c + 1.29)}} \right\}$$

となる。点 0 と点 5 から xy 平面に垂直に下ろした点 R の距離は、

$$R = \sqrt{7253 + 7233 \cos(\theta_c + 1.29)} \cos \left[\theta_b + \cos^{-1} \left\{ \frac{58 - 62.4 \cos(\theta_c + 1.29)}{\sqrt{7253 + 7233 \cos(\theta_c + 1.29)}} \right\} \right] + 20$$

となる。よって、点 5 の座標は

$$x_5 = \left\langle \sqrt{7253 + 7233 \cos(\theta_c + 1.29)} \cos \left[\theta_b + \cos^{-1} \left\{ \frac{58 - 62.4 \cos(\theta_c + 1.29)}{\sqrt{7253 + 7233 \cos(\theta_c + 1.29)}} \right\} \right] + 20 \right\rangle \cos \theta_a$$

$$y_5 = \left\langle \sqrt{7253 + 7233 \cos(\theta_c + 1.29)} \cos \left[\theta_b + \cos^{-1} \left\{ \frac{58 - 62.4 \cos(\theta_c + 1.29)}{\sqrt{7253 + 7233 \cos(\theta_c + 1.29)}} \right\} \right] + 20 \right\rangle \sin \theta_a$$

$$z_5 = 60 - \sqrt{7253 + 7233 \cos(\theta_c + 1.29)} \sin \left[\theta_b + \cos^{-1} \left\{ \frac{58 - 62.4 \cos(\theta_c + 1.29)}{\sqrt{7253 + 7233 \cos(\theta_c + 1.29)}} \right\} \right]$$

となる。

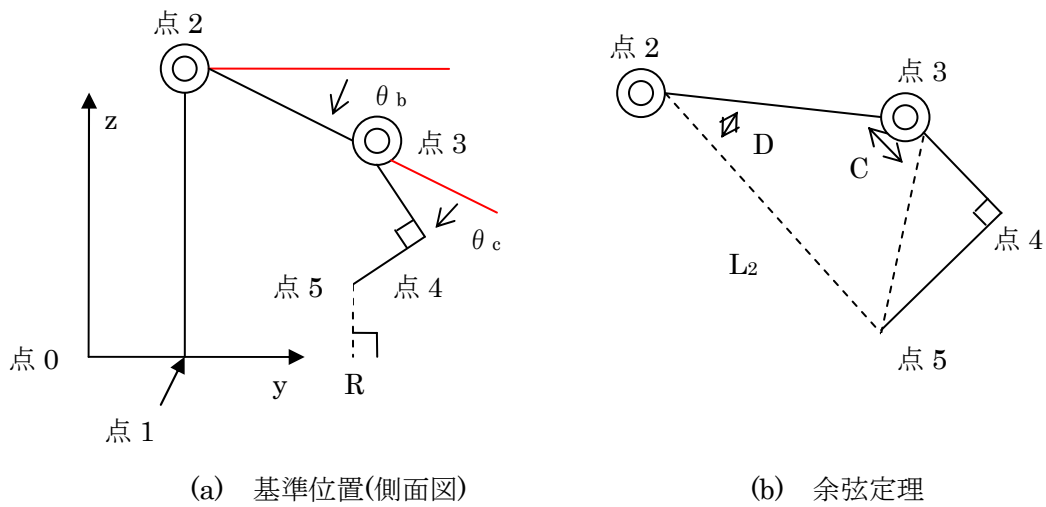


図 8.6 点 5 の導出

点 6 の導出

点 6 の座標を導出する際に、並進と回転の変換行列というものを使用した。

並進と回転の変換行列とは、並進および回転による座標変換を表現するために用いられる。図 8.7 に示すように、座標系 (x_1, y_1, z_1) を、 x_1 方向に l_x 、 y_1 方向に l_y 、 z_1 方向に l_z だけ平行移動させ、 z_0 軸まわりに角度 θ だけ回転させたものが座標系 (x_0, y_0, z_0) と重なる場合、座標系 (x_0, y_0, z_0) から見た P の座標を座標系 (x_1, y_1, z_1) から見た P の座標に変換する行列を以下に示される。

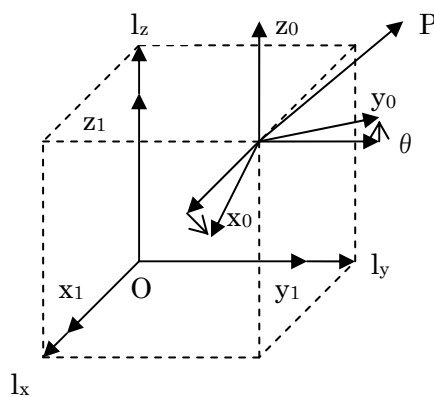


図 8.7 並進および回転の座標変換

$$\begin{pmatrix} P_{x1} \\ P_{y1} \\ P_{z1} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & l_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & l_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & l_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{x0} \\ P_{y0} \\ P_{z0} \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & l_x \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & l_y \\ 0 & 0 & 1 & l_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{x0} \\ P_{y0} \\ P_{z0} \\ 1 \end{pmatrix}$$

図 8.8(a)に示す基準位置を考える。図 8.8 に示す座標系を考える。図座標系 (x_0, y_0, z_0) から見た点 6 の座標は

$$\begin{aligned} 6_{x0} &= 0 \\ 6_{y0} &= 18\cos\theta_e \\ 6_{z0} &= -18\sin\theta_e \end{aligned}$$

となる。座標系 (x_0, y_0, z_0) と座標系 (x_1, y_1, z_1) の座標間の方向余弦は

座標軸 x_0 上の単位ベクトルの x_1 方向の成分は $R_{11} = \cos\theta_d$

y_1 方向の成分は $R_{21} = 0$

z_1 方向の成分は $R_{31} = -\sin\theta_d$

座標軸 y_0 上の単位ベクトルの x_1 方向の成分は $R_{12} = 0$

y_1 方向の成分は $R_{22} = 1$

z_1 方向の成分は $R_{32} = 0$

座標軸 z_0 上の単位ベクトルの x_1 方向の成分は $R_{13} = \sin\theta_d$

y_1 方向の成分は $R_{23} = 0$

z_1 方向の成分は $R_{33} = \cos\theta_d$

となる。よって、座標系 (x_1, y_1, z_1) から見た点 6 の座標は、変換行列より

$$\begin{pmatrix} 6_{x1} \\ 6_{y1} \\ 6_{z1} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & l_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & l_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & l_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 6_{x0} \\ 6_{y0} \\ 6_{z0} \\ 1 \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} \cos\theta_d & 0 & \sin\theta_d & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta_d & 0 & \cos\theta_d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 18\cos\theta_e \\ -18\sin\theta_e \\ 1 \end{pmatrix}$$

となる。

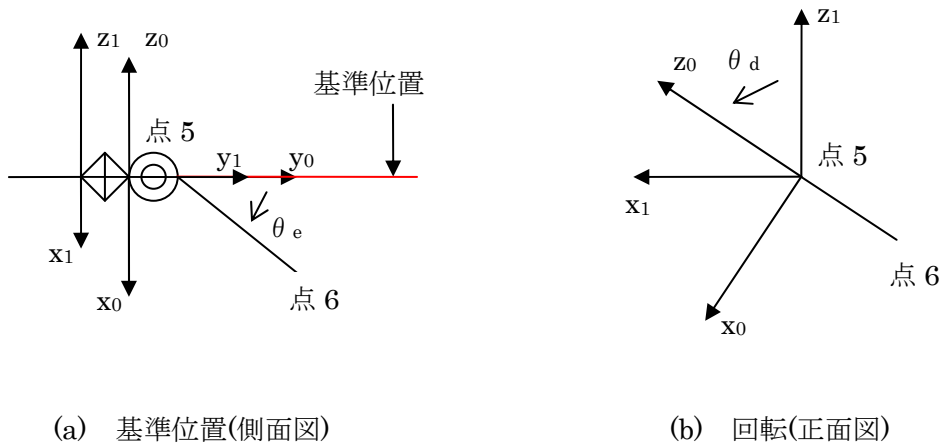


図 8.8 点 6 の導出過程(1)

図 8.9 に示す座標系を考える。角度 E は

$$E = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{60}{17}\right) \\ = 0.276$$

となる。座標系 (x_1, y_1, z_1) と座標系 (x_2, y_2, z_2) の座標間の方向余弦は

座標軸 x_1 上の単位ベクトルの x_2 方向の成分は $R_{11} = 1$

Y_2 方向の成分は $R_{21} = 0$

Z_2 方向の成分は $R_{31} = 0$

座標軸 y_1 上の単位ベクトルの x_2 方向の成分は $R_{12} = 0$

y_2 方向の成分は $R_{22} = \cos E$

z_2 方向の成分は $R_{32} = -\sin E$

座標軸 z_1 上の単位ベクトルの x_2 方向の成分は $R_{13} = 0$

y_2 方向の成分は $R_{23} = \sin E$

z_2 方向の成分は $R_{33} = \cos E$

となる。よって、座標系 (x_2, y_2, z_2) から見た点 6 の座標は、変換行列より

$$\begin{pmatrix} 6_{x_2} \\ 6_{y_2} \\ 6_{z_2} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos E & \sin E & \sqrt{17^2 + 60^2} \\ 0 & -\sin E & \cos E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 6_{x_1} \\ 6_{y_1} \\ 6_{z_1} \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.962 & 0.273 & 62.4 \\ 0 & -0.273 & 0.962 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_d & 0 & \sin \theta_d & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_d & 0 & \cos \theta_d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 18 \cos \theta_e \\ -18 \sin \theta_e \\ 1 \end{pmatrix}$$

となる。

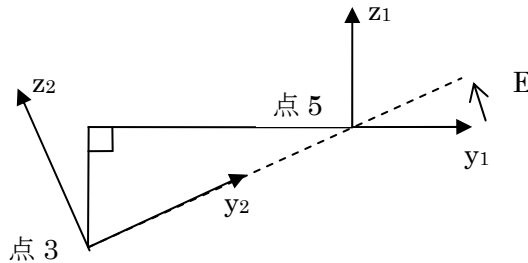


図 8.9 点 6 の導出過程(2)

図 8.10 に示す座標系を考える。角度 F は

$$\begin{aligned} E &= \theta_c - \tan^{-1} \left(\frac{60}{17} \right) \\ &= \theta_c - 1.29 \end{aligned}$$

座標系 (x_2, y_2, z_2) と座標系 (x_3, y_3, z_3) の座標間の方向余弦は

座標軸 x_2 上の単位ベクトルの x_3 方向の成分は $R_{11} = 1$

$$Y_3 \text{ 方向の成分は } R_{21} = 0$$

$$Z_3 \text{ 方向の成分は } R_{31} = 0$$

座標軸 y_2 上の単位ベクトルの x_3 方向の成分は $R_{12} = 0$

$$Y_3 \text{ 方向の成分は } R_{22} = \cos F$$

$$Z_3 \text{ 方向の成分は } R_{32} = -\sin F$$

座標軸 z_2 上の単位ベクトルの x_3 方向の成分は $R_{13} = 0$

$$Y_3 \text{ 方向の成分は } R_{23} = \sin F$$

$$Z_3 \text{ 方向の成分は } R_{33} = \cos F$$

となる。よって、座標系 (x_3, y_3, z_3) から見た点 6 の座標は、変換行列より

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} 6_{x3} \\ 6_{y3} \\ 6_{z3} \\ 1 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos F & \sin F & 58 \\ 0 & -\sin F & \cos F & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 6_{x2} \\ 6_{y2} \\ 6_{z2} \\ 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_c - 1.29) & \sin(\theta_c - 1.29) & 58 \\ 0 & -\sin(\theta_c - 1.29) & \cos(\theta_c - 1.29) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.962 & 0.273 & 62.4 \\ 0 & -0.273 & 0.962 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &\quad \begin{pmatrix} \cos \theta_d & 0 & \sin \theta_d & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_d & 0 & \cos \theta_d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 18 \cos \theta_e \\ -18 \sin \theta_e \\ 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

となる。

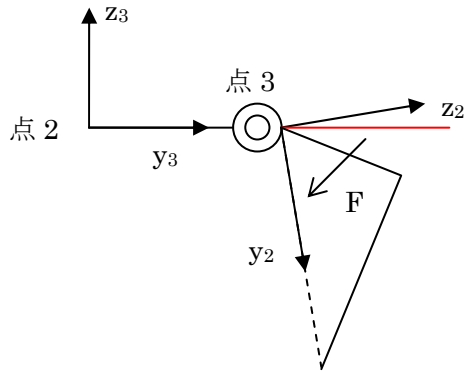


図 8.10 点 6 の導出過程(3)

図 8.11 に示す座標系を考える。座標系 (x_3, y_3, z_3) と座標系 (x_4, y_4, z_4) の座標間の方向余弦は
座標軸 x_3 上の単位ベクトルの x_4 方向の成分は $R_{11} = 1$

$$y_4 \text{ 方向の成分は } R_{21} = 0$$

$$z_4 \text{ 方向の成分は } R_{31} = 0$$

座標軸 y_3 上の単位ベクトルの x_4 方向の成分は $R_{12} = 0$

$$y_4 \text{ 方向の成分は } R_{22} = \cos \theta_b$$

$$z_4 \text{ 方向の成分は } R_{32} = -\sin \theta_b$$

座標軸 z_3 上の単位ベクトルの x_4 方向の成分は $R_{13} = 0$

$$y_4 \text{ 方向の成分は } R_{23} = \sin \theta_b$$

$$z_4 \text{ 方向の成分は } R_{33} = \cos \theta_b$$

となる。よって、座標系 (x_4, y_4, z_4) から見た点 6 の座標は、変換行列より

$$\begin{aligned}
\begin{pmatrix} 6_{x4} \\ 6_{y4} \\ 6_{z4} \\ 1 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_b & \sin\theta_b & 20 \\ 0 & -\sin\theta_b & \cos\theta_b & 60 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 6_{x3} \\ 6_{y3} \\ 6_{z3} \\ 1 \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_b & \sin\theta_b & 58 \\ 0 & -\sin\theta_b & \cos\theta_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_c - 1.29) & \sin(\theta_c - 1.29) & 58 \\ 0 & -\sin(\theta_c - 1.29) & \cos(\theta_c - 1.29) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.962 & 0.273 & 62.4 \\ 0 & -0.273 & 0.962 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_d & 0 & \sin\theta_d & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta_d & 0 & \cos\theta_d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 18\cos\theta_e \\ -18\sin\theta_e \\ 1 \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

となる。

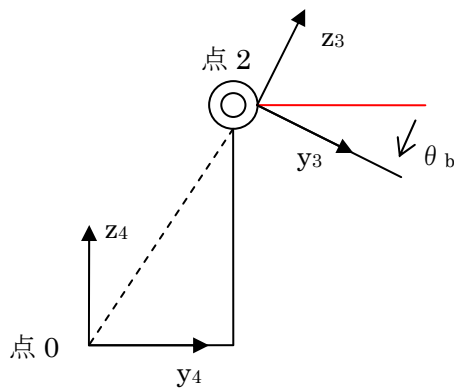


図 8.11 点 6 の導出過程(4)

図 8.12 に示す座標系を考える。座標系 (x_3, y_3, z_3) と座標系 (x_4, y_4, z_4) の座標間の方向余弦は座標軸 x_3 上の単位ベクトルの x_4 方向の成分は $R_{11} = \sin\theta_a$

$$y_4 \text{ 方向の成分は } R_{21} = -\cos\theta_a$$

$$z_4 \text{ 方向の成分は } R_{31} = 0$$

座標軸 y_3 上の単位ベクトルの x_4 方向の成分は $R_{12} = \cos\theta_a$

$$y_4 \text{ 方向の成分は } R_{22} = \sin\theta_a$$

z_4 方向の成分は $R_{32} = 1$

座標軸 z_3 上の単位ベクトルの x_4 方向の成分は $R_{13} = 0$

y_4 方向の成分は $R_{23} = 0$

z_4 方向の成分は $R_{33} = 1$

となる。よって、座標系 (x_4, y_4, z_4) から見た点 6 の座標は、変換行列より

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} 6_x \\ 6_y \\ 6_z \\ 1 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \sin\theta_a & \cos\theta_a & 0 & 0 \\ -\cos\theta_a & \sin\theta_a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 6_{x4} \\ 6_{y4} \\ 6_{z4} \\ 1 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} \sin\theta_a & \cos\theta_a & 0 & 0 \\ -\cos\theta_a & \sin\theta_a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_b & \sin\theta_b & 58 \\ 0 & -\sin\theta_b & \cos\theta_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_c - 1.29) & \sin(\theta_c - 1.29) & 58 \\ 0 & -\sin(\theta_c - 1.29) & \cos(\theta_c - 1.29) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.962 & 0.273 & 62.4 \\ 0 & -0.273 & 0.962 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} \cos\theta_d & 0 & \sin\theta_d & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta_d & 0 & \cos\theta_d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 18\cos\theta_e \\ -18\sin\theta_e \\ 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

となる。

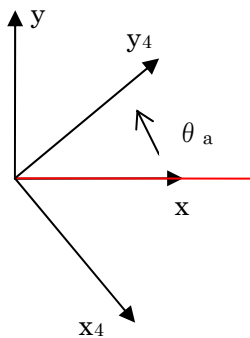


図 8.12 点 6 の導出過程(5)

9. まとめ

6軸マニピュレータの小型測位システムを製作した。また、インクリメンタル形ロータリーエンコーダの回転方向を判別するプログラムを作成し、LabVIEWで小型測位システムの3次元座標を導出した。今後の課題として、先端座標の精度を導出する。また、小型測位システムを固定する際に、イモねじを使用せずに任意の状態に固定されるようにする。

10. 付録

10.1 プログラムリスト 1

```
#include <stdio.h>
#include <p18cxxx.h>
#include <usart.h>
#include "system¥typedefs.h" // Required
#include "system¥usb¥usb.h" // Required
#include "io_cfg.h" // Required
#include "system¥usb¥usb_compile_time_validation.h" // Optional
#include "delays.h"
#include "stdlib.h"

#pragma config FOSC = HSPLL_HS
#pragma config WDT = OFF
#pragma config PLLDIV = 5
#pragma config CPUDIV = OSC1_PLL2
#pragma config USBDIV = 2
#pragma config PWRT = ON
#pragma config BOR = ON
#pragma config BORV = 3
#pragma config LVP = OFF
#pragma config VREGEN = ON
#pragma config MCLRE = ON
#pragma config PBADEN = OFF

int CHANGE(char,char,int);
int HANTEI(char,int);
void ltostring(char digit, int data, char *buffer);

char Message1[]="**** ¥r¥n";
char input_buffer[64]; // USB 入力バッファ
char output_buffer[64]; // USB 出力バッファ
```

```

void main(void)
{
    char cur,saved;
    int count=0;
    TRISA = 0b00000010;
    TRISB = 0b00001110;
    saved = PORTB;
    saved = saved & 0b00000110;
    PORTAbits.RA1= 0;

    OpenUSART(USART_TX_INT_OFF & USART_RX_INT_OFF &
              USART_ASYNC_MODE & USART_EIGHT_BIT &
              USART_CONT_RX & USART_BRGH_HIGH,51);

    TXSTAbits.SENDB = 0;

    while(BusyUSART());

    putsUSART(Message1);
    putsUSART(Message1);

    // USB 初期化
    mInitializeUSBDriver();           // See usbdrv.h

    while(1)
    {
        USBCheckBusStatus();         // USB 接続チェック
        if(UCFGbits.UTEYE!=1)        // アイパターンモードオフか
            USBDriverService();      // USB イベントポーリング
        CDCTxService();
        // クラス送受信実行
        // 受信データの処理実行
        if((usb_device_state >= CONFIGURED_STATE)&&(UCONbits.SUSPND==0))
        {
            if(getsUSBUSART(input_buffer,64)) // データ受信ポール
            {

```

```

switch(input_buffer[0])          // 最初の1文字チェック
{
    case '0':                    // OK 応答
        ltostring(4, count, &Message1[0]);
        if(mUSBUSARTIsTxTrfReady())
            putsUSART(Message1);
        putsUSBUSART("OK");
        putsUSBUSART(Message1);
        break;
    case '9':
        break;
    default: break;
}
}
}
cur = PORTA;
cur=cur & 0b00000110;
if(cur == saved)
{
}
else
{
    count=CHANGE(cur,saved,count);
    saved=cur;
}
}

```

```

int CHANGE(char cur,char saved,int count)

```

```

{
    char x,y,z;
    x = PORTC & 0b00001000;
    if(x == 0b00000000)
    {
        PORTAbits.RA1= 1;
        count = 0;
    }
}

```

```

else
{
    y = saved & 0b00000100;
    if(y == 0b00000100)
    {
        count = HANTEI(cur,count);
    }
    else
    {
        z = cur & 0b000000010;
        if(z == 0b000000010)
        {
            count -= 1;
            if(count == -1)
            {
                count = 3999;
            }
        }
        else
        {
            count += 1;
            if(count == 4000)
            {
                count = 0;
            }
        }
    }
}
return(count);
}

```

```

int HANTEI(char cur,int count)
{
    char x;
    x = cur & 0b000000010;
    if(x == 0b000000010)

```

```

    {
        count += 1;
        if(count == 4000)
        {
            count = 0;
        }
    }
    else
    {
        count -= 1;
        if(count == -1)
        {
            count = 3999;
        }
    }
    return(count);
}

```

//数値から文字列に変換

```

void ltostring(char digit, int data, char *buffer)
{
    char i;
    buffer += digit;
    for(i=digit; i>0; i--) {
        buffer--;
        *buffer = (data % 10) + '0';
        data = data / 10;
    }
}

```

10.2 プログラムリスト 2

```
#include <stdio.h>
#include <p18cxxx.h>
#include <usart.h>
#include "system¥typedefs.h" // Required
#include "system¥usb¥usb.h" // Required
#include "io_cfg.h" // Required
#include "system¥usb¥usb_compile_time_validation.h" // Optional
#include "delays.h"
#include "stdlib.h"

#pragma config FOSC = HSPLL_HS
#pragma config WDT = OFF
#pragma config PLLDIV = 5
#pragma config CPUDIV = OSC1_PLL2
#pragma config USBDIV = 2
#pragma config PWRT = ON
#pragma config BOR = ON
#pragma config BORV = 3
#pragma config LVP = OFF
#pragma config VREGEN = ON
#pragma config MCLRE = ON
#pragma config PBADEN = OFF

int CHANGE(char,char,int); // 使用する関数のプロトタイプ宣言

-----

void main(void) // main 関数
{
    char cur,saved,x[12]; // 変数の宣言
    int count=0,y; // 変数の宣言
    TRISA = 0b00000000; // PORTA の入出力設定(0 : 出力、1 : 入力)
    TRISB = 0b00000000; // PORTB の入出力設定
    TRISC = 0b00000111; // PORTC の入出力設定
    saved = PORTC; // PORTC の状態を保存
    saved = saved & 0b00000011; // A 相,B 相の状態を保存(前回)
```



```

PORTCbits.RC6 = 0;           // RC6 から 0V を出力(LED 消灯)
while(1)                    // 無限に繰り返す
{
    cur = PORTC;            // PORTC の状態を保存
    cur=cur & 0b00000011;  // A 相、B 相の状態を保存(今回)
    if(cur == saved)       // 前回と今回の A 相、B 相の状態が同じか
                            // 判定
    {
    }
    else
    {
        count=CHANGE(cur,saved,count); // CHANGE 関数
                                        // の呼び出し

        saved=cur;
    }
    PORTA = (count % 32) << 1; // count を 32 で割った余りを
                                // PORTA から 1 ビットシフトして出力
    y = count / 32;           // count を 32 で割り、y に代入
    PORTB = y << 1;          // y を PORTB から 1 ビットシフト
                                // して出力
}
}

```

```

int CHANGE(char cur,char saved,int count) // CHANGE 関数
{
    char w,x,y,z; // 変数の宣言
    w = PORTC & 0b00000100; // Z 相の状態を保存
    if(w == 0b00000000) // Z 相が low か判定
    {
        PORTCbits.RC6 = 1; // RC6 から 5V を出力(LED 点灯)
        count = 0; // count をリセットする
    }
    else
    {
        x = saved & 0b00000010; // 前回の B 相の状態を保存
        if(x == 0b00000010) // 前回の B 相が high か判定

```

```

{
    y = cur & 0b00000001; // 今回の A 相の状態を保存
    if(y == 0b00000001) // 今回の A 相が high か判定
    {
        count++; // count に 1 を足す
        if(count == 4000) // count が 4000 か判定
        {
            count = 0; // count をリセットする
        }
    }
    else
    {
        count -= 1; // count から 1 を引く
        if(count == -1) // count が -1 か判定
        {
            count = 3999; // count を 3999 にする
        }
    }
}
else
{
    z = cur & 0b00000001; // 今回の A 相の状態を保存
    if(z == 0b00000001) // 今回の A 相が high か判定
    {
        count -= 1; // count から 1 を引く
        if(count == -1) // count が -1 か判定
        {
            count = 3999; // count を 3999 にする
        }
    }
    else
    {
        count += 1; // count に 1 を足す
        if(count == 4000) // count が 4000 か判定
        {
            count = 0; // count をリセットする
        }
    }
}
}

```

```

    }
}
}
return(count); // count を返す
}

```

10.3 ピン対応

コネクタ

P2.7	1	51	P8.7
P5.7	2	52	P11.7
P2.6	3	53	P8.6
P5.6	4	54	P11.6
P2.5	5	55	P8.5
P5.5	6	56	P11.5
P2.4	7	57	P8.4
P5.4	8	58	P11.4
P2.3	9	59	P8.3
P5.3	10	60	P11.3
P2.2	11	61	P8.2
P5.2	12	62	P11.2
P2.1	13	63	P8.1
P5.1	14	64	P11.1
P2.0	15	65	P8.0
P5.0	16	66	P11.0
P1.7	17	67	P7.7
P4.7	18	68	P10.7
P1.6	19	69	P7.6
P4.6	20	70	P10.6
P1.5	21	71	P7.5
P4.5	22	72	P10.5
P1.4	23	73	P7.4
P4.4	24	74	P10.4
P1.3	25	75	P7.3
P4.3	26	76	P10.3
P1.2	27	77	P7.2
P4.2	28	78	P10.2
P1.1	29	79	P7.1
P4.1	30	80	P10.1
P1.0	31	81	P7.0
P4.0	32	82	P10.0
P0.7	33	83	P6.7
P3.7	34	84	P9.7
P0.6	35	85	P6.6
P3.6	36	86	P9.6
P0.5	37	87	P6.5
P3.5	38	88	P9.5
P0.4	39	89	P6.4
P3.4	40	90	P9.4
P0.3	41	91	P6.3
P3.3	42	92	P9.3
P0.2	43	93	P6.2
P3.2	44	94	P9.2
P0.1	45	95	P6.1
P3.1	46	96	P9.1
P0.0	47	97	P6.0
P3.0	48	98	P9.0
+5 V	49	99	+5 V
GND	50	100	GND

半田面

PIC
側

	P2.7(1) ○	○ P8.7(51)
P5.7(2) ○	P2.6(3) ○	○ P11.7(52) ○ P8.6(53)
P5.6(4) ○	P2.5(5) ○	○ P11.6(54) ○ P8.5(55)
P5.5(6) ○	P2.4(7) ○	○ P11.5(56) ○ P8.4(57)
P5.4(8) ○	P2.3(9) ○	○ P11.4(58) ○ P8.3(59)
P5.3(10) ○	P2.2(11) ○	○ P11.3(60) ○ P8.2(61)
P5.2(12) ○	P2.1(13) ○	○ P11.2(62) ○ P8.1(63)
P5.1(14) ○	P2.0(15) ○	○ P11.1(64) ○ P8.0(65)
P5.0(16) ○	P1.7(17) ○	○ P11.0(66) ○ P7.7(67)
P4.7(18) ○	P1.6(19) ○	○ P10.7(68) ○ P7.6(69)
P4.6(20) ○	P1.5(21) ○	○ P10.6(70) ○ P7.5(71)
P4.5(22) ○	P1.4(23) ○	○ P10.5(72) ○ P7.4(73)
P4.4(24) ○	P1.3(25) ○	○ P10.4(74) ○ P7.3(75)
P4.3(26) ○	P1.2(27) ○	○ P10.3(76) ○ P7.2(77)
P4.2(28) ○	P1.1(29) ○	○ P10.2(78) ○ P7.1(79)
P4.1(30) ○	P1.0(31) ○	○ P10.1(80) ○ P7.0(81)
P4.0(32) ○	P0.7(33) ○	○ P10.0(82) ○ P6.7(83)
P3.7(34) ○	P0.6(35) ○	○ P9.7(84) ○ P6.6(85)
P3.6(36) ○	P0.5(37) ○	○ P9.6(86) ○ P6.5(87)
P3.5(38) ○	P0.4(39) ○	○ P9.5(88) ○ P6.4(89)
P3.4(40) ○	P0.3(41) ○	○ P9.4(90) ○ P6.3(91)
P3.3(42) ○	P0.2(43) ○	○ P9.3(92) ○ P6.2(93)
P3.2(44) ○	P0.1(45) ○	○ P9.2(94) ○ P6.1(95)
P3.1(46) ○	P0.0(47) ○	○ P9.1(96) ○ P6.0(97)
P3.0(48) ○	5V(49) ○	○ P9.0(98) ○ 5V(99)
GND(50) ○		○ GND(100)

コ
ネ
ク
タ
側

11. 参考文献

- [1]米田 完・坪内孝司・大隈 久：はじめてのロボット創造設計，講談社
- [2]下嶋 浩・佐藤 治：ロボット工学，森北出版株式会社
- [3]安川電機，MOTOMAN-HP5 マニピュレータ取扱説明書，HW0482727

12. 謝辞

本研究を行うにあたり、終始変わらぬご指導をして頂いた、本校電子制御工学科の由井
四海教員、実習工場の技官、専攻科生の方々に心から感謝致します。