

立命館大学審査博士論文

配管検査ロボットの曲管内走行
及び分岐管内走行に関する研究

(Study on Traveling through Bent and
Branch Pipes for Pipe Inspection Robots)

2015年3月

March, 2015

立命館大学大学院理工学研究科
機械システム専攻博士課程後期課程

Doctoral Program in Advanced Mechanical Engineering and Robotics
Graduate School of Science and Engineering
Ritsumeikan University

氏名 加古川 篤

氏名 Atsushi Kakogawa

研究指導教員：馬 書根 教授

Supervisor : Professor Shugen Ma

摘要

近年、配管設備の老朽箇所を特定する方法として暗く狭い配管内を点検することのできる配管検査ロボットへの注目が集まっている。これまでに数多くの配管検査ロボットが開発されているものの、曲管及び分岐管に対する走破性の向上が大きな課題となっている。中でも経路が互いに直角に分岐しているT字管内の走行は最も困難な課題であった。

配管内におけるロボットの走破性を左右する要素のひとつにロボットと配管内壁面との接触状態が考えられ、これはロボットが配管内で拡張することのできる空間によって決まる。そこで本論文では、配管検査ロボットを小型化の実現し易い連結能動関節型と高い牽引力を発揮できる干渉駆動型の2つに分類し、連結能動関節型の例として螺旋駆動型配管検査ロボットを、干渉駆動型の例として3モジュール型ロボットを用いて、曲管やT字管を走行するための基本原理と理論を示し、それらに基づくロボットの設計手法と制御方法について述べた。

まず、曲管内走行における基本走行理論では、螺旋駆動型と3モジュール型の両方に共通に使用できることを示した。経路が連続している曲管内では接触点の推定が容易に行え、これらをロボットの設計に活用する。一方、T字管では経路が連続しておらず、接触点を容易に推定することはできないため、螺旋駆動型と3モジュール型のそれぞれにおいて異なる理論を展開する。

次に、螺旋駆動型配管検査ロボットの設計では、1つのモーターでPitchとYawの2つの屈曲動作を行うことができる新しい経路選択機構を提案した。また、曲管走行及びT字管走行の解析で得た空間的な制約を基に、伸縮機構の腕の長さやバネ剛性の設計を行った。3モジュール型配管検査ロボットの設計では、既存のロボットが抱えていた障害物を伴う配管内の走行問題に対して、劣駆動平行四辺形クローラと呼ばれる新たな機構を提案することによって対応した。このクローラ機構が受動的に障害物適応動作を行えるよう静力学解析を行い、歯車の歯数比の設計を行った。また、各モジュールの制御方法を曲管内走行及びT字管内走行の解析で得た空間的な制約を基に提案した。

最後に曲管とT字管を用いて螺旋駆動型と3モジュール型の両方の走破性検証実験を行った。ここで得られた実験結果から、それぞれのロボットの曲管内走行性能とT字管内走行性能を総合的に評価し、T字管内走行実験では問題が残ったものの、曲管内では効率の良い走行が可能であることを明らかにした。

Abstract

The study of pipe inspection robots, which can check inside dark and narrow pipelines instead of humans, has been expected last few years to survey the deterioration of the aging pipelines. Various kinds of pipe inspection robots have been studied and developed by several research and educational institutes and companies so far. However, existing studies consider that bent and branch pipes are one of the biggest obstacles; improvement for the mobility through them is a serious issue. It is recognized that a T-branch, where two pathways are perpendicular to each other, is the most difficult challenge among the branch pipes.

One of the possible factors which affect the mobility of the robot inside the pipelines is the contact state between the robot and the inner wall of the pipe. This state depends on the specific spatial constraints of the robot to expand in the pipes. Therefore, this thesis presents basic theory for passing through bent pipes and T-branches using a screw-driving pipe inspection robot as an articulated active joint type, which can be downsized easily, and a three modular pipe inspection robot as a coupled driven type, which can generate high traction force. Additionally, a description about the design and control method for both of them is included.

First of all, in the theory for passing through bent pipes, a common methodology which can be applied to both, the screw-driving type and the three modular type, is proposed. This is because contact points can be easily estimated in a continuous bent pipe. This common theory is also used for the design of the robot. On the other hand, contact points in the T-branch cannot be estimated easily as it is not continuous. Therefore, different theory for the screw-driving type and the three modular type in T-branch pipes is discussed.

Secondly, in the design of the screw-driving type, a new pathway selection mechanism, which enables pitch and yaw steerings using only a single motor, is proposed. The arm length and spring stiffness of the contractile mechanism is designed based on the spatial constraints obtained by the theory abovementioned. In the design of the three modular type, a new mechanism, called an underactuated parallelogram crawler, is proposed to solve the problem when the pipeline changes its diameter, which the existing robots have not been able to easily overcome. The gear ratio of the mechanism is designed using static analysis to get the ideal motion of the crawler. Control method for each module is proposed based on the spatial constraints obtained by the theory previously explained.

At last, experimental verifications of the screw-driving type and the three modular type are conducted in bent pipes and T-branches. From the results, performance of each robot type in both of them are comprehensively evaluated and future work is discussed. Even though problems left in the experiment of the T-branch, it was found that the robots can pass through the bent pipe efficiently.

目次

第 1 章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 既存研究	5
1.2.1 連結能動関節型配管検査ロボット	5
1.2.2 干渉駆動型配管検査ロボット	9
1.3 研究目的	13
1.4 本論文の構成	13
第 2 章 配管検査ロボットの移動原理	15
2.1 螺旋駆動型の移動原理	15
2.2 3 モジュール型の移動原理	18
2.3 まとめ	23
第 3 章 曲管内及び T 字管内走行の基礎理論	25
3.1 曲管内走行の基礎理論	25
3.1.1 ロボットの重心軌道	26
3.1.2 曲管の断面形状の定式化	38
3.1.3 伸縮機構の拡張範囲	48
3.2 T 字管走行の基礎理論	60
3.2.1 螺旋駆動型の場合	60
3.2.2 3 モジュール型の場合	70
3.3 まとめ	71
第 4 章 配管検査ロボットの設計	73
4.1 螺旋駆動型配管検査ロボットの設計	73
4.1.1 基本構造	73
4.1.2 3つの動作モード	75
4.1.3 バネ剛性と腕の長さの設計	77
4.1.4 操作用コントローラー	80
4.2 3 モジュール型配管検査ロボットの設計	81
4.2.1 基本構造	81
4.2.2 劣駆動平行四辺形クローラ	83
4.2.3 静力学解析	87
4.2.4 歯車の歯数比の設計	94
4.2.5 操作用コントローラー	101
4.2.6 段差走行実験	103

4.3	まとめ	104
第5章	曲管内走行実験	105
5.1	螺旋駆動型配管検査ロボットの実験	105
5.1.1	実験環境	105
5.1.2	基本動作確認実験	105
5.1.3	モータートルクの計測実験	106
5.2	3モジュール型配管検査ロボットの実験	112
5.2.1	実験環境	112
5.2.2	基本動作確認実験	112
5.2.3	曲管内走行の基礎理論に基づく実験	113
5.3	まとめ	121
第6章	T字管内走行実験	123
6.1	螺旋駆動型配管検査ロボットの実験	123
6.1.1	実験環境	123
6.1.2	実験結果	124
6.2	3モジュール型配管検査ロボットの実験	126
6.2.1	実験環境	126
6.2.2	実験結果	126
6.3	まとめ	130
第7章	結論と今後の課題	131
7.1	結論	131
7.2	今後の課題	132
7.2.1	配管検査ロボット共通の課題	132
7.2.2	螺旋駆動型配管検査ロボットの課題	134
7.2.3	3モジュール型配管検査ロボットの課題	134
	参考文献	139
	研究業績	143
付録A	モーターのPID 角度制御	147
A.1	ブロック線図	147
A.2	電子回路	148
付録B	モーターのトルク定数の計測	153
B.1	実験装置	153
B.2	計測結果	154
付録C	引用図表	155

目 次

1.1	Thickness measurement of pipes using ultrasonic wave	2
1.2	Existing in-pipe inspection method	2
1.3	Legged type in-pipe inspection robot “MORITZ”	3
1.4	Peristaltic motion robot	3
1.5	Meandering-type robot	3
1.6	Articulated active joint type	4
1.7	Coupled driven type	5
1.8	Planetary gear based 1-inch in-pipe inspection robot	5
1.9	MRINSPECT III: in-pipe inspection robot with a double active uni- versal joint	6
1.10	HELI-PIPE: screw-driving type pipe inspection robot	7
1.11	Thes I: screw-driving type pipe inspection robot with continuously variable transmissions	7
1.12	PIPETRON	8
1.13	PIKo (Pipe Inspection Konda)	8
1.14	Miniature pipe inspection robot	9
1.15	MRINSPECT series	10
1.16	Tbot 80	10
1.17	PAROYS-II	11
1.18	Versatrax vertical crawler	11
1.19	FAMPER	12
1.20	Crab-Robot	12
2.1	Structure of the screw-driving pipe inspection robot	15
2.2	Mechanics of the screw-driving pipe inspection robot	16
2.3	Rotational vector of the screw-driving pipe inspection robot	16
2.4	Straight-line motion of the screw-driving pipe inspection robot	17
2.5	Geometric relationship of the screw-driving pipe inspection robot	17
2.6	Structure of the three modular pipe inspection robot	18
2.7	Kinematic model of the three modular pipe inspection robot	19
3.1	Movement trajectory of the robot while it passes through a bent pipe	25
3.2	Unnatural movement in bent pipe	26
3.3	Two-dimensional geometric model in a bent pipe	27
3.4	Boundary of the robot’s axial length (screw-driving type)	29
3.5	Calculation result of the 2D model (screw-driving type)	30

3.6	Trajectory of center of the screw-driving type	31
3.7	y_c and z_c coordinates of the screw-driving type	32
3.8	Orientation angle of the screw-driving robot ϕ_b with respect to D . .	32
3.9	Derivative of ϕ_b with respect to D in case of the screw-driving type .	33
3.10	Rectangle model in a bent pipe	34
3.11	Calculation result of the rectangle model	35
3.12	Boundary of the robot's axial length (three modular type)	36
3.13	Trajectory of center of the three modular type	36
3.14	y_c and z_c coordinates of the three modular type	37
3.15	Orientation angle of the three modular type robot ϕ_b with respect to D	37
3.16	Derivative of ϕ_b with respect to D in case of the three modular type .	38
3.17	Cross-sections of the robot in a bent pipe	39
3.18	Cross-sections of straight and bent pipes when $z_{ro} < 0$	40
3.19	Cross-sections of a bent pipe when $z_{ro} \geq 0$	42
3.20	Cross-sections of a straight pipe when $z_{ro} \geq 0$	44
3.21	Front, middle, and rear cross-sections in the case of the screw-driving type ($L_b = 80$).	45
3.22	Front, middle, and rear cross-sections in the case of the screw-driving type ($L_b = 140$).	46
3.23	Front, middle, and rear cross-sections in the case of the three modular type.	47
3.24	Balanced position of the robot in the expandable space (screw-driving type)	49
3.25	Thickness of the wheels	50
3.26	Balanced position of the robot with considering the wheel's thickness (screw-driving type)	51
3.27	Three trajectories of the wheels in the bent pipe ($L_b = 80$)	52
3.28	Arm length of the screw-driving type ($L_b = 80$)	52
3.29	Rotator's position in the case of the screw-driving type ($L_b = 80$) . .	53
3.30	Three trajectories of the wheels in the bent pipe ($L_b = 140$)	54
3.31	Arm length of the screw-driving type ($L_b = 140$)	54
3.32	Rotator's position in the case of the screw-driving type ($L_b = 140$) . .	55
3.33	Balanced position of the robot in the expandable space (three modular type)	56
3.34	Position of the three modular type robot in 3D.	57
3.35	Position of the three modular type robot in 2D.	58
3.36	Arm length of the three modular type	59
3.37	Variation of the pulleys rotational angle where $\theta_a = 0$	59
3.38	Cross-section of a T-branch	60
3.39	Division of a T-branch	61
3.40	Angled cross-section of a straight pipe	61
3.41	Simplified model of steering process in a T-branch	62

3.42	Corresponding angles of boundary between two pipes	63
3.43	Turning around a fulcrum point	64
3.44	Front unit when the arm touches inner wall of the next pipe	64
3.45	Front unit when $\phi_c < \phi$	65
3.46	Transition of cross-section of a T-branch	66
3.47	Width between two inner edges	66
3.48	Size of a front unit	67
3.49	Height with respect to θ , when $\ell_0 = 67$	68
3.50	Steerability in a T-branch	69
3.51	Steering motion in a T-branch	70
4.1	Overview of the screw-driving pipe inspection robot	74
4.2	Schematic of the system	74
4.3	Screw-driving mode	75
4.4	Steering mode	76
4.5	Rolling mode	76
4.6	Elastic arms	77
4.7	Forces that act when the radius is compressed	78
4.8	Structure of the arm	78
4.9	Motor torque required for rotation in the bent pipe	79
4.10	Overview of a controller for the screw-driving pipe inspection robot	80
4.11	Configuration of a controller for the screw-driving pipe inspection robot	80
4.12	A mechanical model of the three modular pipe inspection robot	81
4.13	A pantograph mechanism used to change the diameter of the robot	82
4.14	Uneven posture eventually generated	82
4.15	Similar mobility for anterior-posterior symmetric transformation	83
4.16	A CAD model of an underactuated parallelogram crawler module	85
4.17	The two modes of the differential mechanism	86
4.18	Stopper pins used to limit the rotational angle of the arm	86
4.19	Guide roller to guarantee smooth motion of the belt	86
4.20	Branch pipe models for torque distribution	87
4.21	Possible external forces acting on the underactuated parallelogram crawler when it encounters with a step	88
4.22	Roll angle of the robot	90
4.23	Torque of the front pulley and tangential forces acting on the track belt when it encounters with a step	93
4.24	Effects of the expanding force F_s , where $\mu_s = 0.4$, $\gamma = 0$, $\phi_r = 180^\circ$	95
4.25	Expanding force of the contractile mechanism	96
4.26	Effect of the roll angle ϕ_r , where $\mu_s = 0.4$, $F_s = 5.5$ [N], $\gamma = 0$	97
4.27	Effect of the initial friction τ_i , where $\mu_s = 0.4$, $F_s = 5.5$ [N], $\gamma = 0$, $\phi_r = 180^\circ$	98
4.28	Effect of the slope angle γ , where $\mu_s = 0.4$, $F_s = 5.5$ [N], $\phi_r = 0$	99

4.29	Effect of the sliding frictional coefficient μ_s in the parallelogram mode, where $F_s = 5.5$ [N], $\phi_r = 0$, $\gamma = 0$	100
4.30	Overview of a controller for the three modular pipe inspection robot .	101
4.31	Configuration of a controller for the three modular pipe inspection robot	101
4.32	Setting of the joystick	102
4.33	Speed ratio between each module	102
4.34	Experimental setup of stepped pipes	103
4.35	Experimental sequence in the constriction pipes	103
4.36	Experimental sequence in a straight pipe with a partial step	104
5.1	Pipes for the experiment of the screw-driving pipe inspection robot .	105
5.2	Experimental result at a bent pipe	106
5.3	Experimental setup for the motor torque measurement	107
5.4	Configuration of the control system for the motor torque measurement	107
5.5	PID controller for the motor torque measurement	108
5.6	Experimental sequence of the screw-driving pipe inspection robot in a bend pipe	108
5.7	Measured value of the motor torque where $k = 0.1$ [N/mm].	109
5.8	Measured value of the motor torque where $k = 0.3$ [N/mm].	110
5.9	Measured value of the motor torque where $k = 0.5$ [N/mm].	111
5.10	A bent pipe for the experiment of the three modular pipe inspection robot	112
5.11	Experimental sequence of the three modular pipe inspection robot in a bend pipe	113
5.12	Rotational angle of the pulleys where $\theta_a = 0 + 360n^\circ$	114
5.13	Variation of the pulleys rotational angle where $\theta_a = 30 + 360n^\circ$	114
5.14	Rotational angle of the pulleys where $\theta_a = 30 + 360n^\circ$	115
5.15	Experimental setup for the three modular pipe inspection robot . . .	116
5.16	Configuration of the control system for the three modular pipe inspection robot	117
5.17	PID controller for the three modular pipe inspection robot	117
5.18	Motor current where $\theta_a = 0 + 360n^\circ$	118
5.19	Motor current with same speed where $\theta_a = 30 + 360n^\circ$	118
5.20	Experimental sequence of the three modular pipe inspection robot with different speed where $\theta_a = 30 + 360n^\circ$	119
5.21	Motor current with different speed where $\theta_a = 30 + 360n^\circ$	120
6.1	A T-branch for the experiment of the screw-driving pipe inspection robot	123
6.2	Turning right at a T-branch which branches to left and right (screw-driving type)	124

6.3	Turning right at a T-branch which branches to stright and right (screw-driving type)	125
6.4	Moving forward in a T-branch (screw-driving type)	125
6.5	Passive rolling motion at a T-branch	126
6.6	A T-branch for the experiment of the three modular pipe inspection robot	127
6.7	Turning left at a T-branch which branches to left and right (three modular type)	128
6.8	Turning left at a T-branch which branches to stright and left (three modular type)	128
6.9	Moving forward in a T-branch (three modular type)	129
6.10	Moving forward with different position (three modular type)	129
7.1	Experimental sequence of the screw-driving pipe inspection robot in a vertically positioned bend pipe	133
7.2	Experimental sequence of the three modular pipe inspection robot in a vertically positioned bend pipe	133
A.1	PID block diagram for angle control of the motor	147
A.2	Circuit for the PIC16F88	148
A.3	Circuit for the Arduino Nano	149
A.4	Wiring diagram for the PIC16F88	150
A.5	Wiring diagram for the Arduino Nano	151
B.1	A device for measuring the torque coefficient of the motor	153
B.2	Current when the rotator is stopped	154

表 目 次

3.1	Parameters of a two-dimensional geometric model	27
3.2	Maximum height of the rotator (front unit)	68
4.1	Specifications of the screw-driving pipe inspection robot	73
4.2	Specifications of the three modular pipe inspection robot	81
4.3	Definition of mechanics parameters	89
4.4	Definition of geometric parameters	90
4.5	Setting of parameters in the analysis	95

第 1 章

序論

1.1 研究背景

近年、高度経済成長期につくられた社会インフラの老朽化・陳腐化が進行し、東日本大震災による藤沼ダム(福島県須賀川市)の決壊や笹子トンネル(山梨県大月市と同県甲州市)の天井板崩落をはじめとした深刻な事故が次々に顕在化し始めている。これらの事故リスクは全国各地の高齢化した橋、配管、港湾、空港等々にも潜んでおり、中でも都市部に無数に張り巡らされている水道管やガス管の破裂漏洩事故や身の回りの製品の元になるプラスチック素材や化学繊維の製造に欠かせないコンビナートでの爆発・火災事故が問題となっている。2011年6月には京都府京都市西京区の経年劣化した水道管が破裂し、その影響でガス管にも穴が空いたため、周辺の約1万3000世帯でガス供給停止状態、約1500世帯で断水状態となった。翌年2012年4月には山口県岩国市の老朽化したコンビナートが爆発し、爆風による被害は近隣住民の安全を脅かすほど広範囲に及んだ。同年7月には大阪府堺市の水道管が破裂し、堺市と和泉市の約3万3000世帯で断水・濁り水状態となった。その他にも老朽化が原因で発生したトラブルは各地で相次いで報告されており、耐用年数を超えていなくても、補修や点検がなごりにされ、脆弱化しているケースも少なくない。配管の事故はライフラインを断つだけでなく漏れ出したガスへ引火する危険性もはらんでいるため、劣化箇所の補修・交換作業が急務となっている。

配管の補修・交換作業を行う過程で最も重要な課題は優先順位をいかに定めるかであり、緊急を要する劣化箇所をあらかじめ正確に特定し、必要最小限の費用と人員で作業を行えるか否かがその後の効率を大きく左右する。これまでの点検には超音波や磁気を利用した肉厚測定機器(図1.1)が用いられており[1]、直径の小さな配管は内部からの検査ができないため配管外部から人間の手によって検査を行う方法が一般的であった[2]。しかし、手作業で配管外部から点検を行う方法は時間と労力がかかる上、高所や地中に設置された配管の検査が困難となってしまう。また、配管には人体毒性や爆発性のあるCOガス、シランガス、引火性可燃ガスを含むものもあるため、作業者の健康を害する危険性もはらんでいる。そのため、配管の維持・管理にかかる費用や手間を減らし、安全性をも担保する工夫が求められている。

このような背景の中、昨今の機械電子技術の発展に伴い、カメラや肉厚測定センサー(超音波方式・磁気方式)をロボットに搭載し、配管内部から点検を行う非破壊検査技術(NDT: Non Destructive Testing)への関心が高まってきている[3]。これま

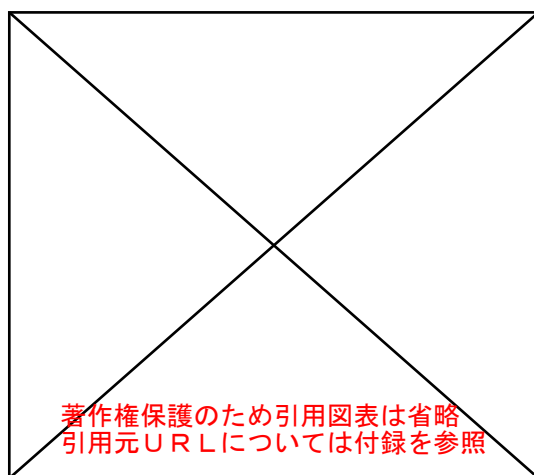


図 1.1: Thickness measurement of pipes using ultrasonic wave

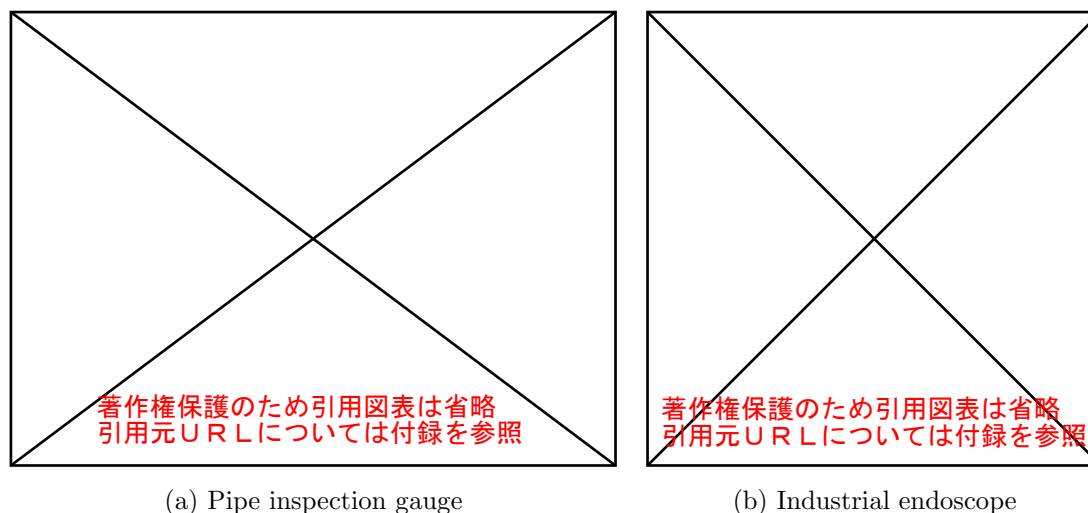


図 1.2: Existing in-pipe inspection method

で配管内部から検査を行うものとして、配管内の流体の力を利用してカメラや検査装置を押し出して移動させる PIG(Pipe Inspection Gauge)と呼ばれる方式 [4] が数多く報告されているが、受動的に移動するため分岐部分では経路選択ができない上、配管内圧が十分でなければ移動することができない(図 1.2 (a)). また、手軽に扱えるものとして先端にカメラが取り付けられた工業用内視鏡(図 1.2(b))も広く普及しているが、人間の手で押し込まなければならないため、湾曲部が連続するような配管形状には不向きとなる。

そこで近年、企業や研究教育機関によって数多くの自立移動型配管検査ロボットに関する取り組みが行われている。自立移動型配管検査ロボットは大まかに、歩行方式、蠕動運動方式、蛇行方式、無限回転方式に分類することができる。歩行方式は図 1.3 のように複数の脚機構で配管内を突っ張りながら移動を行うが、制御が複雑化するだけでなくロボット全体が大きくなってしまったため報告例が極端に少ない [5]。蠕動運動方式(図 1.4)はミミズやヒル等の蠕虫で見られるような伝播性の収縮波を生み出す運動を利用して複数の節に分かれたロボットの本体を順番に押し出しながら移動する [6]。いずれかの節が常に配管内と接触し摩擦力を得るため、垂直配

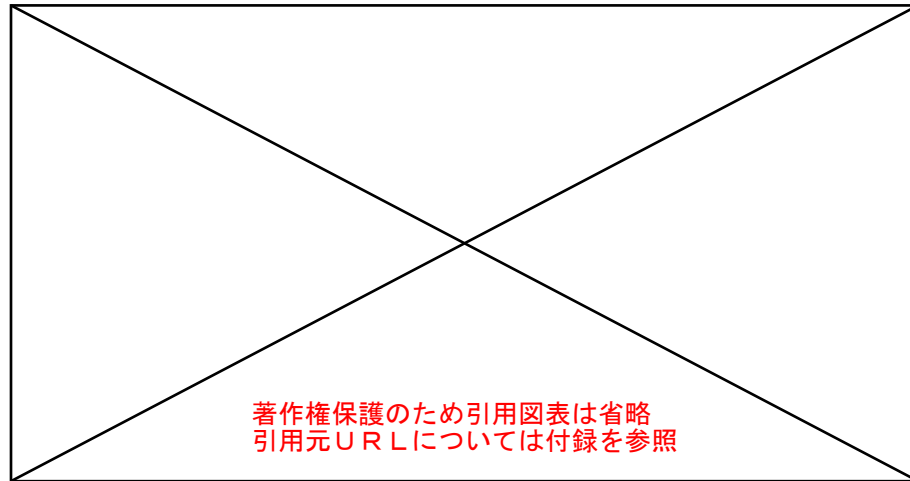


図 1.3: Legged type in-pipe inspection robot “MORITZ”

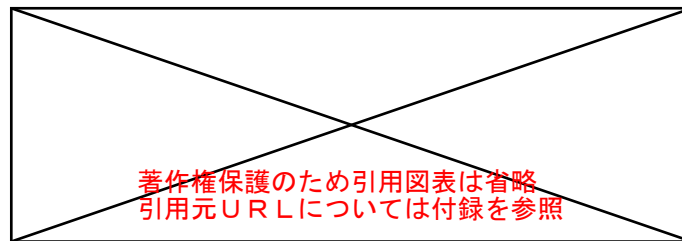


図 1.4: Peristaltic motion robot

管内の移動に強く，小型化や軽量化が容易であるが，移動速度が遅いため使用環境が限定される．蛇行方式 (図 1.5) は生物のへビで見られるような複数の体節から成る細長い構造に波形を送って配管内を移動するもので，通常の蛇型移動ロボットとは異なり，波とロボットの進行方向が同じになる [7]．

一方，無限回転方式は車輪やクローラ機構を使用して配管内を移動するもので，移動速度が早く，製作が容易なことから前述のものに比べ圧倒的に事例が多い．無

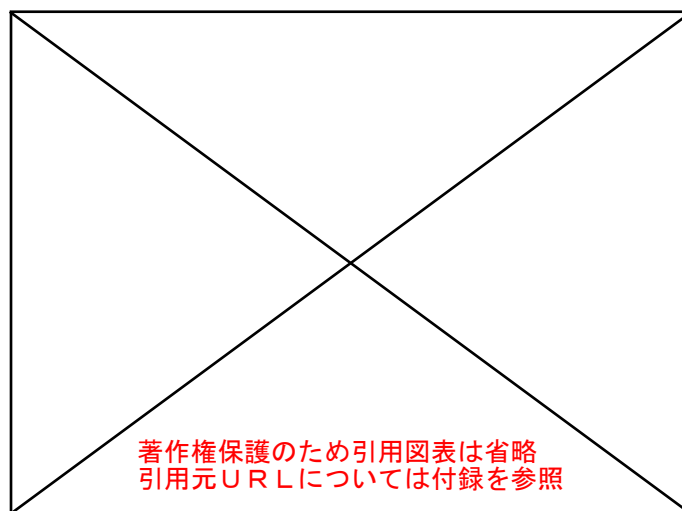


図 1.5: Meandering-type robot

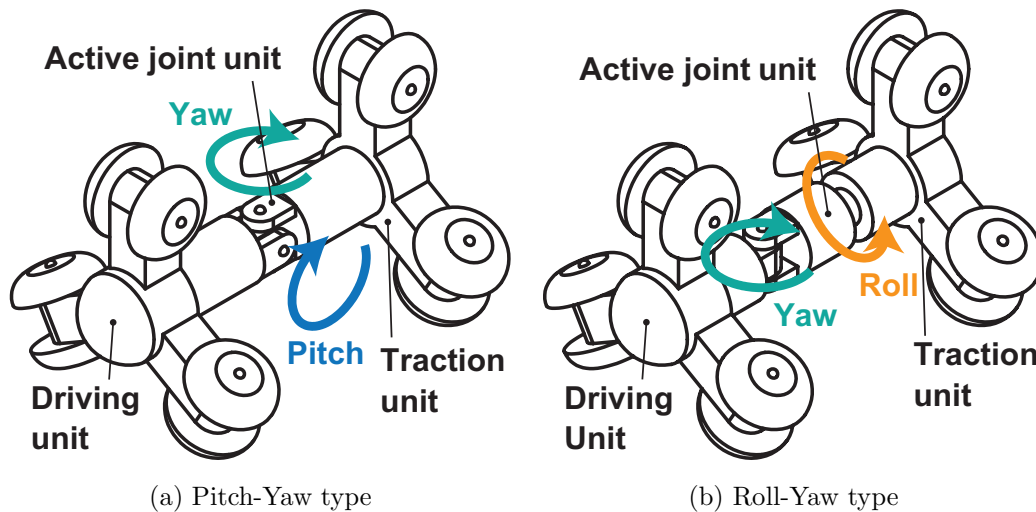


図 1.6: Articulated active joint type

限回転方式は駆動部の配置の仕方によって、さらに連結能動関節型と干渉駆動型の大きく2つに分けることができる。連結能動関節型は図1.6のように駆動ユニットと牽引ユニットが2自由度の能動関節によって連結された構造になっており、移動のために用いるアクチュエータ(駆動ユニット)と方向転換のために用いるアクチュエータ(能動関節)が互いに独立して駆動する。能動関節は回転軸の向きによって図1.6(a)や図1.6(b)のように動作が異なる。図1.6(a)はPitch軸とYaw軸周りの回転動作を組み合わせることにより進行方向に対して上下左右に駆動ユニットの向きを変えることができるが、図1.6(b)は前部の関節そのものを根元のRoll軸周りの関節によって回転させるため、Roll軸周りの回転が進行方向の基準となる。

干渉駆動型は移動のためのアクチュエータを方向転換にも用いるもので、図1.7のように中央のモジュールと放射状に配置された複数の駆動モジュールによって構成されている。通常、直管内ではこれら複数の駆動モジュールをすべて同じ速度に保ちながら走行するため、アクチュエータ単体が持つ牽引力をモジュールの数だけ増大させることができる。曲管や分岐管ではそれぞれの駆動モジュールの速度や移動方向を調整することで、建設機械や戦車のような超信地旋回の原理を利用して方向転換を行う。そのため、各モジュールはそれぞれが互いに干渉し合う構造となっている。配管内で上下左右に方向転換するためには駆動モジュールが最低3つ必要となる。

連結能動関節型と干渉駆動型のいずれにおいても前後の移動と上下左右の方向転換を行うためにはアクチュエータが最低3つ必要となるが、一般的に連結能動関節型の方が小型軽量化が容易で、干渉駆動型の方が牽引力の面で優れている。そのため、対象となる配管の大きさや形状、牽引する装置の重さ、検査距離、等々の要求仕様に合わせた設計が必要となる。この分類は配管検査ロボットだけでなく通常の移動ロボットに対しても当てはまり、ロボット製作において考慮すべき重要な設計要素の1つとなっている。また、水平のみならず垂直の配管を移動するためには、車輪やクローラ機構が配管内部の壁面に常に押し付けられた状態でなければ十分な摩擦力を得られないため、無限回転方式の配管検査ロボットの多くはバネを用いた受動伸縮機構やアクチュエータを用いた能動伸縮機構を備えている。

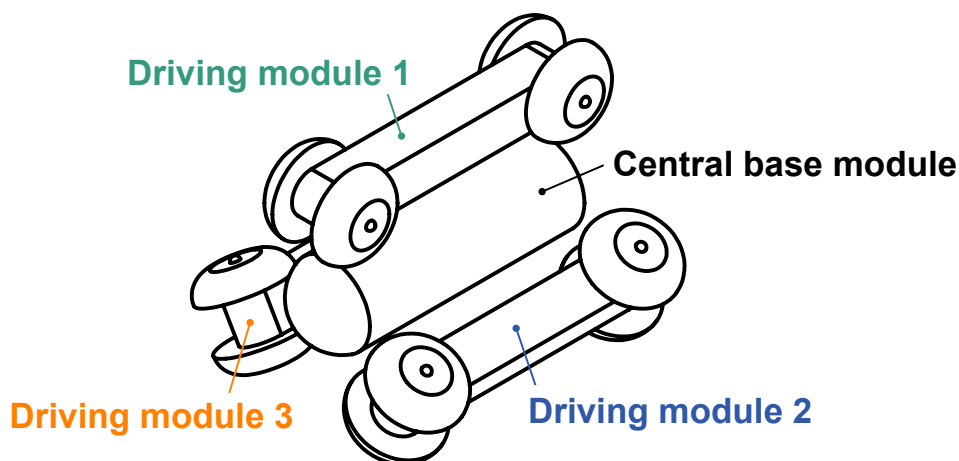


図 1.7: Coupled driven type

1.2 既存研究

無限回転方式の配管検査ロボットに関する従来の研究および技術状況について前述の分類を基に概観する。

1.2.1 連結能動関節型配管検査ロボット

典型的な連結能動関節型配管検査ロボットの特徴を持つものとして、東京工業大学、株式会社東芝、岡山大学が中心となって開発した図1.8のロボットが挙げられる [8] [9]。このロボットの駆動ユニットは中央のモーターの回転をウォームギアを介して放射状に3つの車輪へ伝達する構造となっており、すべての車輪の動作が同期するようになっている。また、駆動ユニットにはFMA(Flexible Micro Actuator)と呼ばれる繊維強化ゴムからなる空圧アクチュエータが接続されており、弾性体の伸縮を利用してPitch軸とYaw軸周りに方向を変えることができる。それぞれの車輪は遊星歯車機構が持つ差動機構としての原理が応用されており、モーターからの入力をロボットの移動だけでなく伸縮機構にも用いることができる。モーターや歯車等

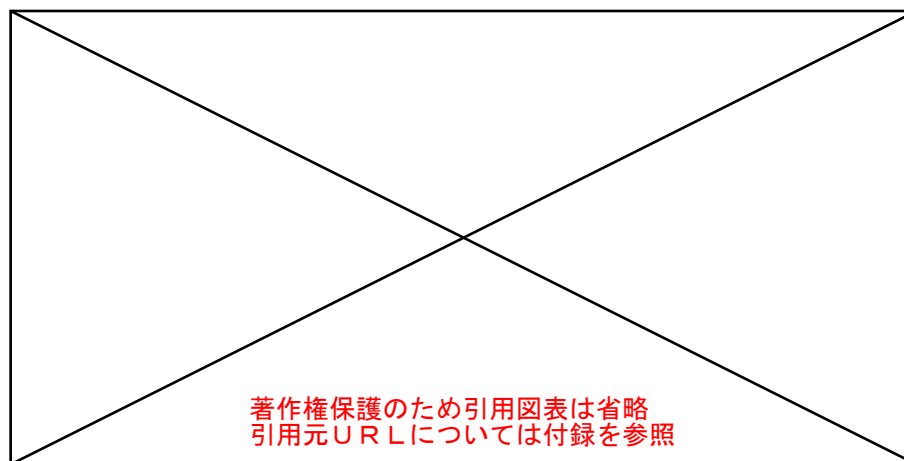


図 1.8: Planetary gear based 1-inch in-pipe inspection robot

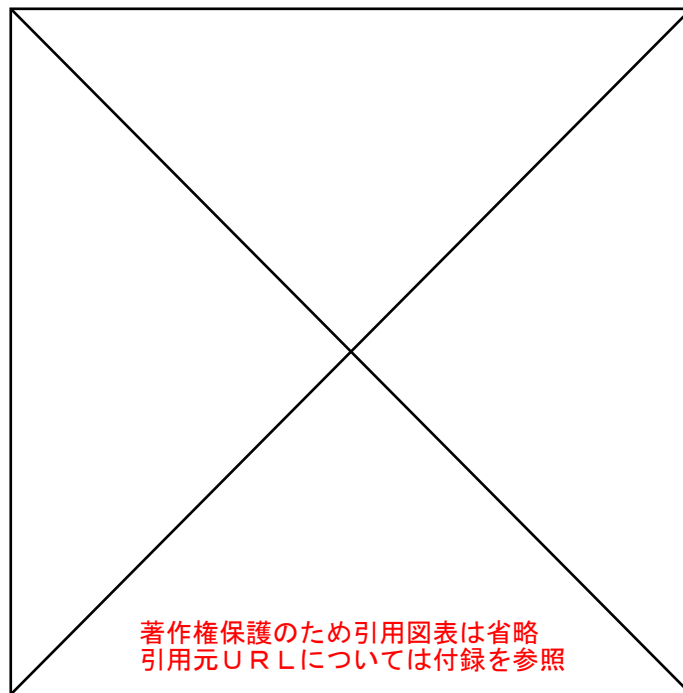


図 1.9: MRINSPECT III: in-pipe inspection robot with a double active universal joint

の部品の多くは特注で生産されているため、内径 1 インチ (約 25 [mm]) という大幅な小型化が達成されている。しかし、FMA の曲率半径がロボット全体に対して大きくなってしまったため、大曲管などの曲率半径の大きな曲管には対応できるが、角が直角に曲がったエルボー管への対応は難しい。

類似のロボットとして、韓国の成均館 (ソンギョングン) 大学では 8 インチ管 (内径約 200 [mm]) を対象とした MRINSPECT III が開発されている (図 1.9) [10]。このロボットも中央のモーターの回転をウォームギアとタイミングベルトを用いて車輪に伝達している。しかし、MRINSPECT III は図 1.8 のロボットとは異なり、能動関節に Double active universal joint (DAUJ) と呼ばれる特殊な機構を用いている。この DAUJ は斜旋回機構および内部と外部の 2 種類のユニバーサルジョイントで構成されており、それぞれのユニバーサルジョイントを能動的に駆動することによって Pitch 軸と Yaw 軸周りの回転が可能になっている。また、車輪は複数のリンクを組み合わせたパンタグラフ機構とロボット中央部のバネによって常に配管内の壁面に押し付けられている。

一方、螺旋駆動機構と呼ばれる特殊な車輪機構を用いた配管検査ロボットも連結能動関節型の無限回転方式に分類することができる。螺旋駆動機構は配管の円周方向に対して傾斜角を持った車輪を駆動ユニットの周りに放射状に複数配置し、それらを回転させることでネジのように螺旋を描きながら移動するものである。この機構は配管の軸方向に配置したモーターの回転軸を直接駆動ユニットに接続することができ、ウォームギアやはすば歯車等の回転方向を変えるための機構が不要になるため、小型化が容易となる。

図 1.10 の HELI-PIPE と呼ばれるロボットは、ベルギーのブリュッセル自由大学で開発されたもので、駆動ユニットと牽引ユニットがユニバーサルジョイントで接

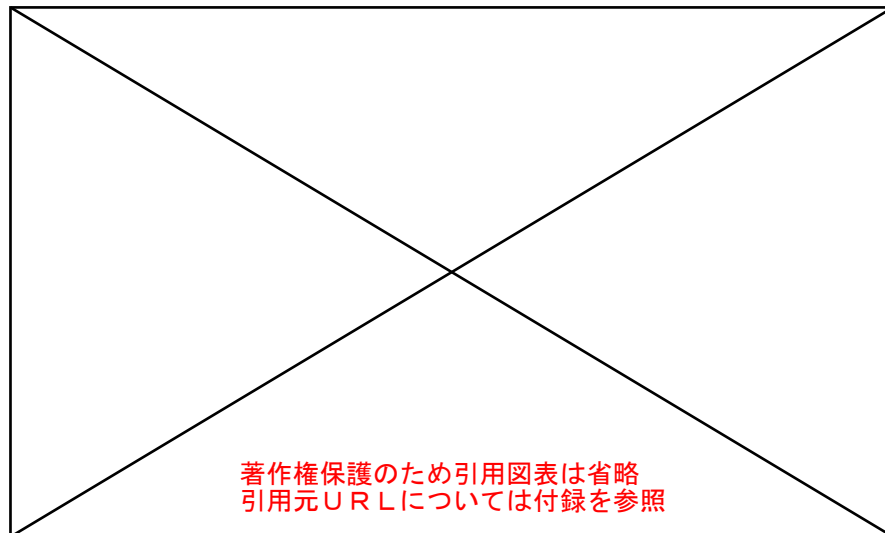


図 1.10: HELI-PIPE: screw-driving type pipe inspection robot

続されているため、曲率半径の大きな大曲管であれば走行することができるが、角が直角に曲がったエルボー管内は走行することができない [11]. このロボットは車輪がコイルバネによって配管内の壁面に押し付けられているため、垂直状態でも移動することができる. 駆動ユニットの回転の反作用は傾斜角を持たない後部の車輪によって支えられている. HELI-PIPEは配管の大きさによって内径 70 [mm] 用のものと内径 40 [mm] 用のものがある.

東京工業大学で開発された配管内径 50 [mm] を対象とする Thes I(図 1.11) も HELI-PIPE と同様に駆動ユニットと牽引ユニットがユニバーサルジョイントで接続されているが、駆動ユニットの車輪はスプリングワイヤーによって配管内に押し付けられている [12]. これにより、推進抵抗が大きくなった際、配管の円周方向に対する車輪の傾斜角が小さくなることで自動的に低速高出力動作に切り替わる無段変速機 (CVT: Continuously Variable Transmission) としての機能を実現している. また、このロ

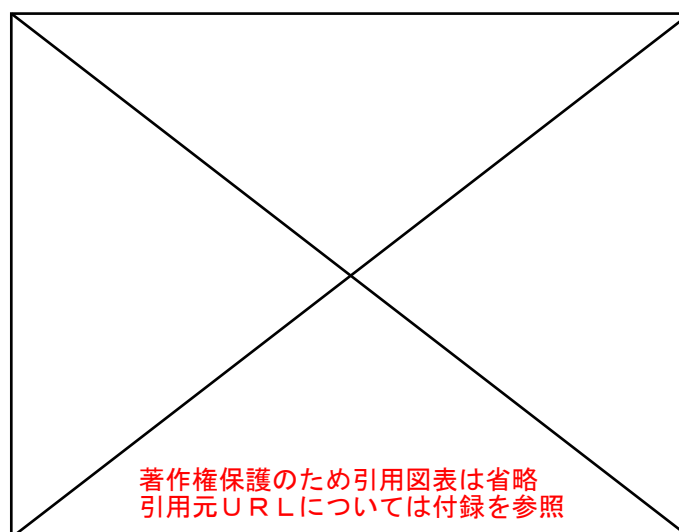


図 1.11: Thes I: screw-driving type pipe inspection robot with continuously variable transmissions

ボットは駆動ユニットを2つ用いて回転方向を互いに逆にすることで回転の反作用を打ち消し合っている。いずれの機構も能動関節を有していないため、分岐管内で方向転換を行うことためには新たにアクチュエータを追加しなければならない。

さらに、ここ最近では複数の能動関節を組み合わせた新たな連結能動関節型ロボットも報告され始めている。これらの姿形は蛇に似ているものの、すべて車輪の無限回転によって移動を行うため、前述の蛇行方式(図1.5)とは異なる。

図1.12に示すPIPETRONと呼ばれるロボットは株式会社ハイボットや東京工業大学を中心に開発された配管内径78 [mm]を対象とするもので、複数の球形車輪とリンクによって構成されている [13] [14]。それぞれの球形車輪にはPitch軸とYaw軸周りの受動関節が備わっており、ロボット全体を2本1対のワイヤーで引っ張ることにより配管内壁面への突っ張り動作と屈曲動作の両方を実現している。この2本のワイヤーは球形車輪ごとに先端から交互に向きを変えながら通っているため、片方のワイヤーを解放した状態でもう一方のワイヤーを引っ張ると、ノコギリの刃のように何度も折れ曲がったジグザグ姿勢をとることができる。この状態では、車輪が螺旋軌道に乗るため、ロボットはRoll軸周りの回転運動が可能となり、屈曲動作の向きを変えることができる。

PIKo(図1.13)はスカンジナビア最大の独立研究機関「SINTEF」を中心に開発された配管内径240 [mm]を対象とするロボットで、複数の能動車輪ユニットがPitch軸とYaw軸周りの複数の能動関節によって繋がれている [15]。PIPETRONと比較すると、2軸の能動関節を備えているため、Roll回転を行うことなく上下左右に体を屈曲させることが可能であるが、必要なアクチュエータ数が大幅に増加するため、

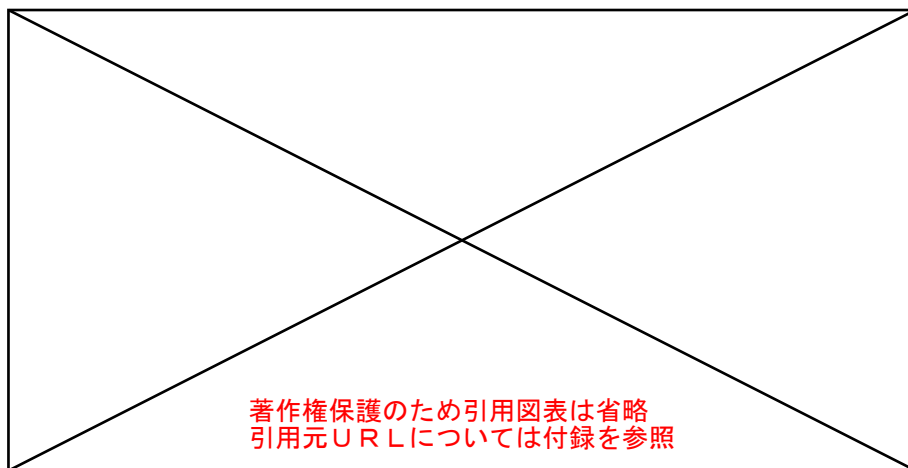


図 1.12: PIPETRON

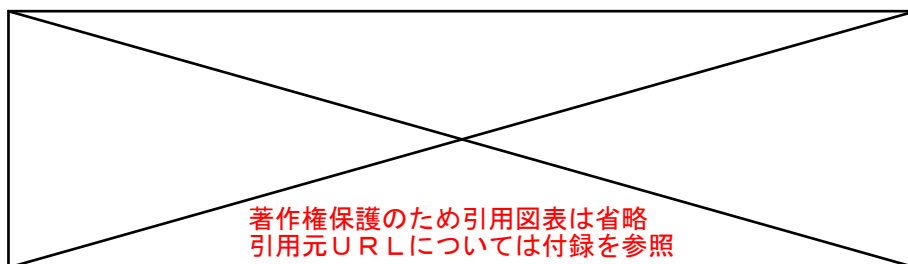


図 1.13: PIKo (Pipe Inspection Konda)

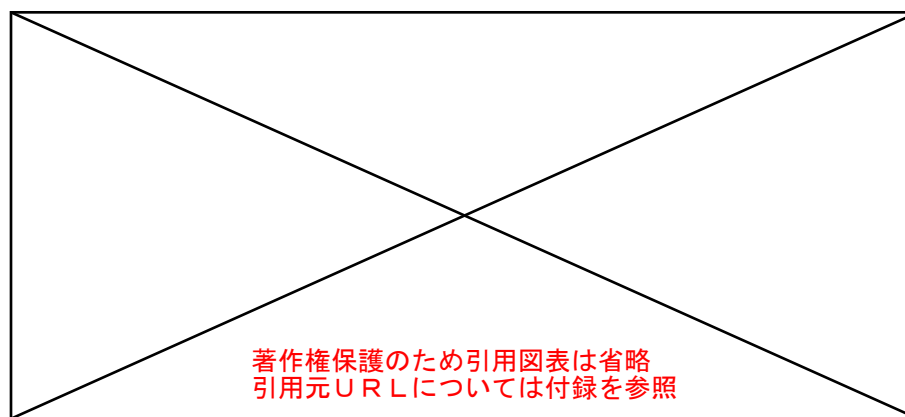


図 1.14: Miniature pipe inspection robot

小型化し難い構造となっている。

図 1.14 のロボットはオランダのトゥウェンテ大学で開発されたもので、複数の車輪とリンクによって構成されている [16] [17]。小型化を実現するため、車輪は前後に 2 つの山形を形成するリンクの頂点部分のみ (前から数えて 2 番目と 7 番目の車輪) 能動となっており、最小で配管内径 63 [mm] まで対応可能となっている。同様に、リンクの関節も車輪を前から数えて 2 番目、3 番目、6 番目、7 番目の部分のみが能動になっており、これらを屈曲させることで曲管や分岐管を走行したり、配管内の壁面を突っ張ることができる。また、ロボット中央には Roll 回転を行う能動関節が備わっているため、リンクの屈曲方向を変えることができる。

1.2.2 干渉駆動型配管検査ロボット

干渉駆動型配管検査ロボットに分類されるものとしては、韓国の成均館 (ソングンガン) 大学で開発された MRINSPECT IV (図 1.15 (a)) および MRINSPECT V (図 1.15 (b)) や同じく韓国の漢陽 (ハニャン) 大学で開発された Tbot 80 (図 1.16), 延世 (ヨンセイ) 大学で開発された PAROYS-II 等が挙げられる [18] [19] [20] [21]。MRINSPECT IV は 1.2.1 項で述べた MRINSPECT III (図 1.9) の後継機で 3 つの駆動モジュールをそれぞれ独立して制御することにより、直管だけでなく曲管や分岐管も走行することができる。駆動モジュールの前後 2 つの車輪はシャフトを通して繋がっているため同期して回転するようになっている。

MRINSPECT V は MRINSPECT IV の後継機で、外観は似ているが、MRINSPECT V の駆動モジュールにはそれぞれ電磁クラッチが備わっているため、車輪を能動と受動に切り替えることができる。これにより、水平状態の直管内等、牽引力をあまり必要としない状況では 3 つの駆動モジュールの内、1 つだけを駆動させて残り 2 つのモジュールを追随させることで、無駄なエネルギー消費を抑えることができる。また、曲管内においても同様に制御することで、旋回時に問題となるモジュール間の速度差を自然に補うことができる。MRINSPECT IV と MRINSPECT V は、いずれも 4 インチ管 (配管内径約 100 [mm]) を対象としたもので、伸縮機構にパンタグラフとバネを用いているため受動的に配管内の壁面を押し付ける構造になっている。

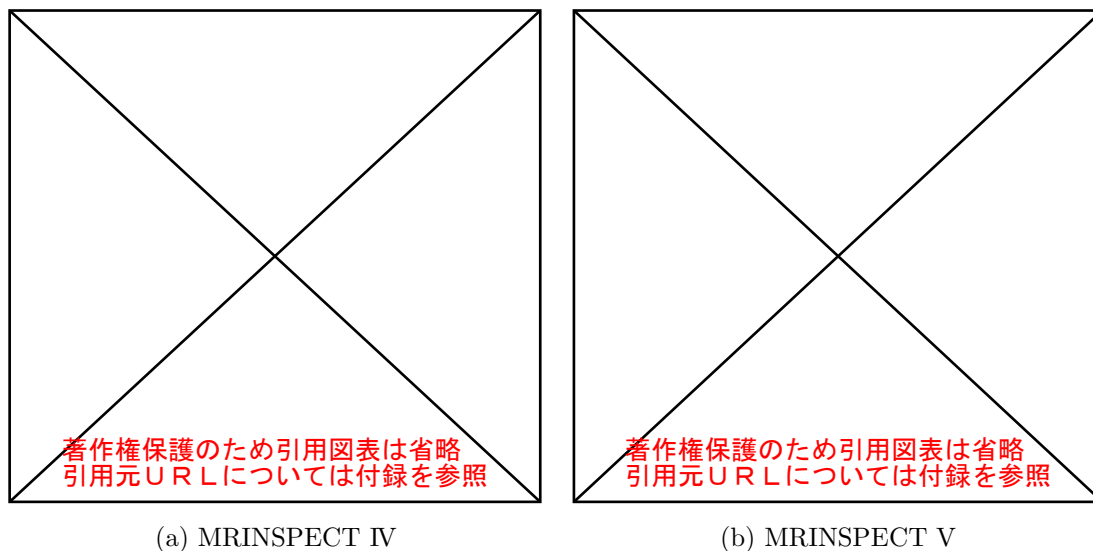


図 1.15: MRINSPECT series

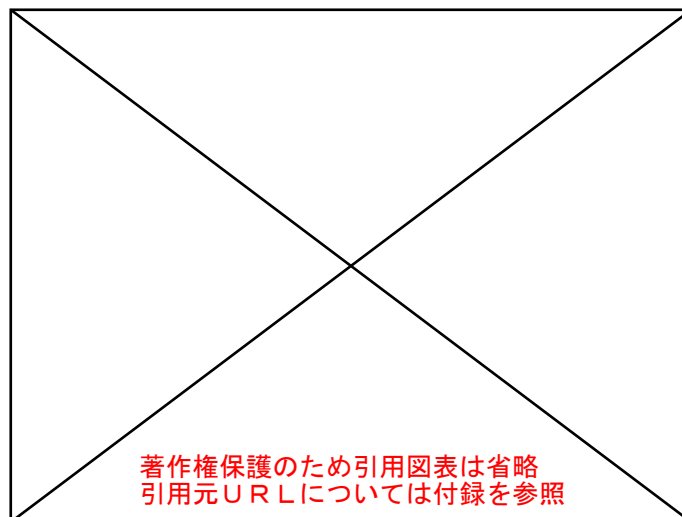


図 1.16: Tbot 80

図 1.16 に示す Tbot 80 は駆動モジュールがシリコンゴムを用いたクローラ機構になっているため、モジュール全体で駆動力を発生させることができる。また、伸縮機構にはパンタグラフとバネが用いられているが、MRINSPECT とは異なり、駆動モジュールごとに取り付けられている。そのため、それぞれが独立して壁面を押し付けることができ、配管内の部分的な凹凸にも適応することができる。配管の適応内径は 80 [mm] から 100 [mm] となっている。

図 1.17 に示す PAROYS-II は MRINSPECT シリーズや Tbot 80 等と同じ構造となっているが、中央の滑りネジによって伸縮機構を能動的に制御することができる。また、各モジュールのクローラには能動的なフリッパーアームが備わっているため、障害物に対しても高い走破性を実現している。しかし、多くのアクチュエーターや機構を必要とするため、配管の適応内径は 400 [mm] から 700 [mm] とやや大型化している。

一方、カナダの Inuktun Services Ltd. (ISL) によって開発された Versatrax vertical

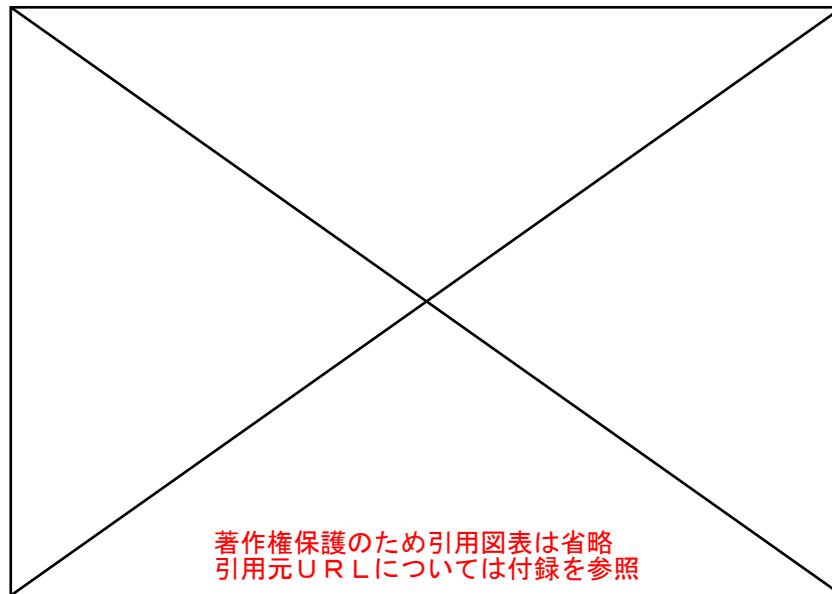


図 1.17: PAROYS-II

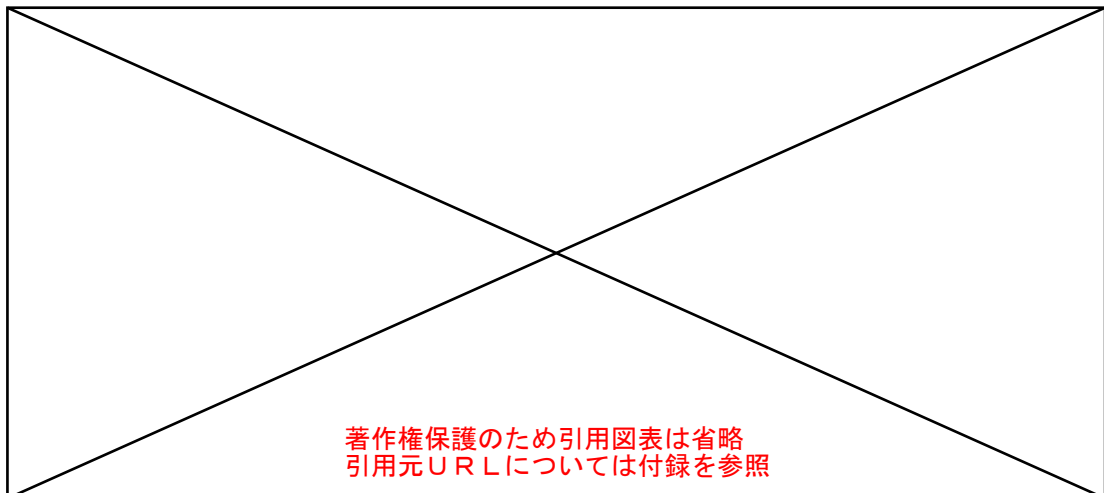


図 1.18: Versatrax vertical crawler

crawler(図 1.18) は、配管内径 200 [mm] から 300 [mm] を対象とするもので、3つの駆動モジュールに加えて中央部に PAROYS-II と同様のパンタグラフと滑りネジを用いた能動伸縮機構を備えている [22]。壁面押付力を能動的に変えることが可能なため、垂直の直管内で成人男性を引っ張りながら移動できるほどの牽引力を有している。

以上のロボットはすべてモジュールの数が 3 つとなっているが、ルイジアナ州立大学では図 1.19 に示すようにモジュールを 4 つ備えた対応径 150 [mm] の干涉駆動型配管検査ロボット (FAMPER) を提案している [23]。4 モジュールは、3 モジュールに比べると駆動部の接触面積を増やすことができるが、伸縮範囲は狭くなる。また、3次元空間では冗長なシステムとなるため、制御方法に工夫が必要になる。

ドイツの Endo Service GmbH では図 1.20 のような 6 つのモジュールを備えた Crab-Robot と呼ばれるロボットを開発している [24]。同社はこの種類のロボットを複数開発しており、最も小さいもので対応径は 48 [mm] となっている。

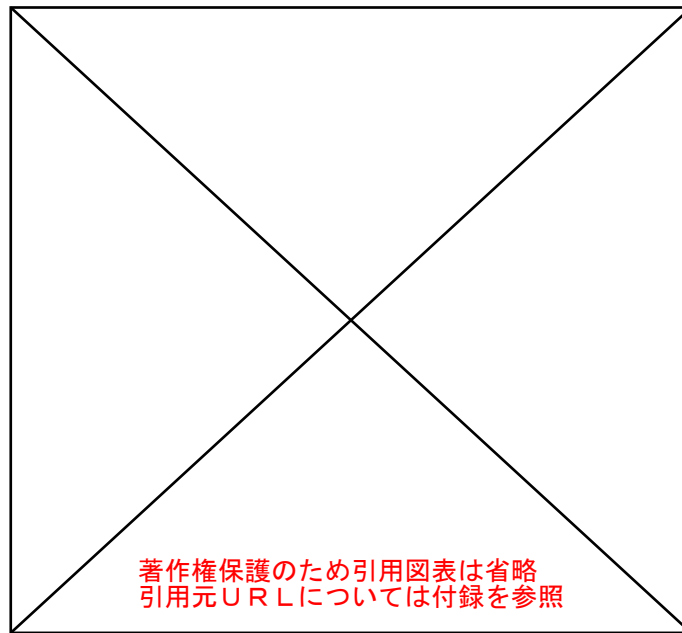


図 1.19: FAMPER

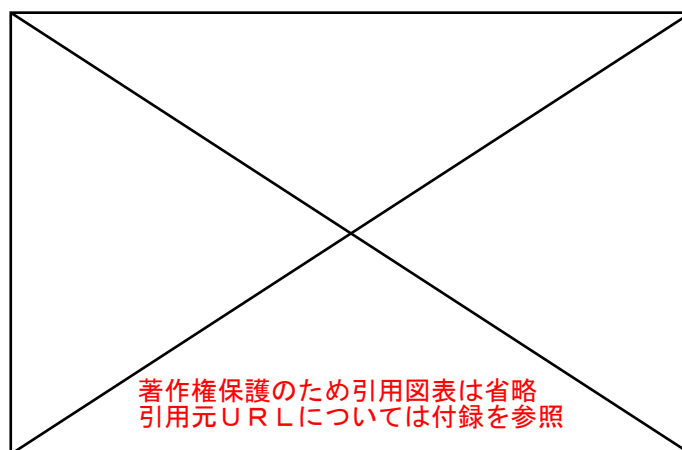


図 1.20: Crab-Robot

1.3 研究目的

前節で示したように、配管検査ロボットは小型化が容易な連結能動関節型と牽引力の強い干渉駆動型に分かれ、配管の大きさや形状、牽引する装置の重さ、検査距離、等々の要求仕様によって使い分ける必要がある。特に、配管内の走行を妨げる障害は湾曲部や分岐部等のように方向転換を強いられる部分であるため、このような配管の大きさや形状に対してロボットの直径や長さをいかに設計し、各アクチュエータをどのように制御するかがロボットの走破性を左右する重要な要素となっている。例えば、ロボットが水平のみならず垂直状態でも移動したり、十分な牽引力を得るためには、摩擦力を得るための伸縮機構などによって配管内の壁面を押し付ける必要があるが、多くの場合、受動的な機構を用いているため、曲管内や分岐管内においてもロボットの直径は拡張しようとする。その結果、大きな抵抗が生じて走行が阻害されてしまう。この壁面押付力を調節するために能動的な伸縮機構を用いれば、アクチュエータや動力伝達機構を追加する必要があるため、ロボットが大型化したり制御が複雑になってしまう。また、水平状態であっても駆動部と配管内壁面との接触状態によってロボットに加わる外力のバランスが変化し、姿勢が崩れてしまうこともある。

このように、屋外環境とは異なり、配管内はロボットが占めることのできる空間が制限されるため、環境に応じて理想的な配管内壁面との接触状態を保てるような機構設計や制御が必要となる。そこで本論文では、曲管や分岐管を走行するためのロボットの設計要件や各アクチュエータの制御方法を配管形状を基に連結能動関節型と干渉駆動型の2種類の配管検査ロボットを用いて明らかにし、それぞれが持つ特性を考察しながら曲管内及び分岐管内における走行性能を総合的に評価することを目的とする。なお、連結能動関節型には小型化が容易な螺旋駆動型を採用し、干渉駆動型には最も典型的な3モジュール型を採用する。いずれの場合においても、より小型で軽量なものを実現するため、バネを用いた受動伸縮機構を採用し、120°間隔で放射状の3方向に伸縮するように配置する。

また、曲管には経路が連続する曲率半径の大きな大曲管と経路が折れ曲がっている曲率半径の小さなエルボー管(L字管)があり、分岐管にも配管が斜め方向に分岐したY字管や直角に分岐したT字管が存在する。さらに、T字管の中にも分岐部分の角が尖っているものと滑らかなものがあり、種類は様々である。そのため本論文では、曲管に経路が連続する大曲管を使用することで配管形状を利用した方向転換の可能性を追求し、T字管には角が尖っているものを使用することで最も悪条件下の走行性能を評価する。T字管を走行することができれば、より環境が易しいエルボー管(L字管)も走行が可能であると判断できる。

1.4 本論文の構成

本論文は「配管検査ロボットの曲管内走行及び分岐管内走行に関する研究」と題し全7章で構成する。

第1章「序論」では、本研究の背景と目的を述べた。ここでは、社会インフラとして我々の生活や産業を支える配管設備の老朽化は深刻化しており、劣化箇所の効

率的な特定による点検作業の省力化が望まれていることを示した。また、配管検査ロボットは大きく分けると連結能動関節型と干渉駆動型に分類され、想定する配管の大きさや形状、牽引する装置の重さ、検査距離、等々の要求仕様によって使い分ける必要があることを示した。

第2章「配管検査ロボットの移動原理」では、本研究で対称とする螺旋駆動型配管検査ロボットと3モジュール型配管検査ロボットの移動原理についてそれぞれ述べる。螺旋駆動型配管検査ロボットの移動原理では、ロボットがなぜ螺旋を描きながら移動するのかを解説し、モーターの回転角度とロボットの移動距離の関係について述べる。3モジュール型配管検査ロボットの移動原理では、3つのモジュールとロボット全体の運動学的な関係を明らかにし、直進及び旋回の原理について解説する。

第3章「曲管内及びT字管内走行の基礎理論」では、ロボットが曲管内及びT字管内を走行するために必要な基礎的な理論について述べる。曲管内走行の基礎理論では、螺旋駆動型配管検査ロボットと3モジュール型配管検査ロボットのいずれの場合においても、曲管内の空間的制約がその走破性に影響を与えることを示す。T字管内走行の基礎理論では、能動関節を有する螺旋駆動型配管検査ロボットとそれぞれのモジュールが干渉し合いながら旋回動作を行う3モジュール型配管検査ロボットの走行理論について解説する。

第4章「配管検査ロボットの設計」では、本研究で開発した螺旋駆動型配管検査ロボットと3モジュール型配管検査ロボットについて解説する。ここでは第3章で得られた曲管内及びT字管内走行に必要な制約条件に基づきロボットの機械設計とコントローラーの設計を行う。

第5章「曲管内走行実験」では、螺旋駆動型配管検査ロボットと3モジュール型配管検査ロボットの曲管内における走破性の検証実験を行う。ここでは第4章で述べた設計内容の有用性を検証する。

第6章「T字管内走行実験」では、螺旋駆動型配管検査ロボットと3モジュール型配管検査ロボットのT字管内における走破性の検証実験を行う。

第7章「結論と今後の課題」では、本研究で得られた結論を述べるとともに、残された課題と今後の展望について述べる。

第 2 章

配管検査ロボットの移動原理

本章では連結能動関節型の1つである螺旋駆動型配管検査ロボットと干渉駆動型の1つである3モジュール型配管検査ロボットの移動原理について解説する。

2.1 螺旋駆動型の移動原理

螺旋駆動型配管検査ロボットは図 2.1 のように、前部ユニットにあたるローテーター（回転子）と後部ユニットにあたるステーター（固定子）で構成されており、一般的にはステーターに取り付けたモーターの回転軸をローテーターに固定して駆動させる。ローテーターとステーターには、コイルバネによって車輪を配管内壁面に押し付けるための腕が 120° 間隔で放射状に取り付けられている。これらの内、ローテーターの車輪にのみいくらか傾きが設けられており、この状態で回転すると、その反作用がステーターによって支えられ、車輪は螺旋を描きながら移動することができる。この

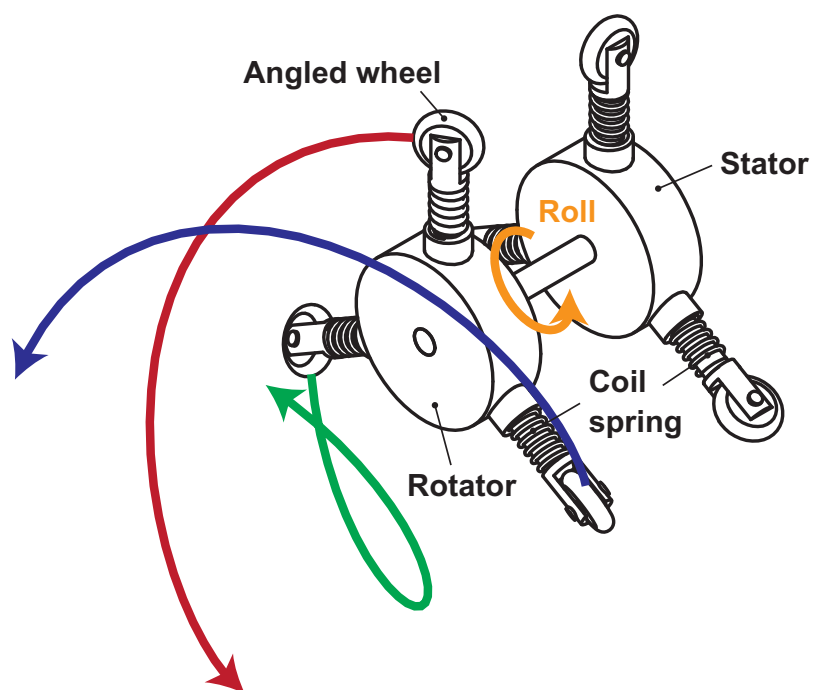


図 2.1: Structure of the screw-driving pipe inspection robot

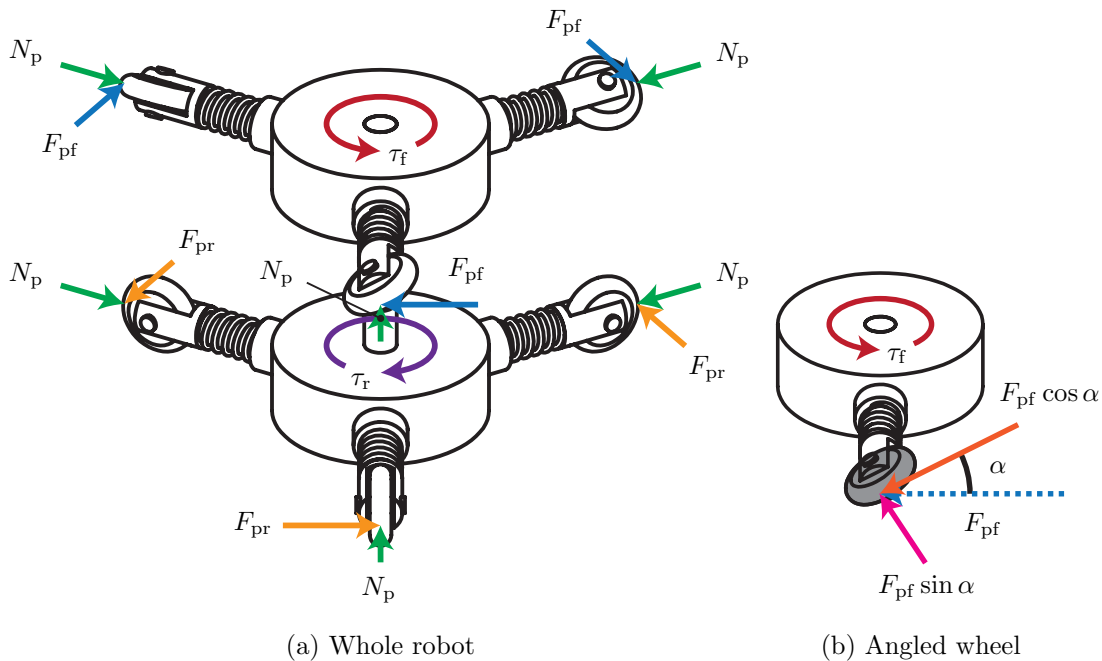


図 2.2: Mechanics of the screw-driving pipe inspection robot

ときの移動原理を図 2.2 に示す。まず、図 2.2(a) のようにロボットの車輪はすべてバネによって押し付けられているため、配管内壁面から垂直抗力 N_p を受ける。この状態でモーターを回転させると、ローターを回すためのトルク τ_f が発生し、その反作用トルク τ_r がステーターにも発生する。ステーターの車輪はロボットの進行方向に対してのみ回転するよう取り付けられているため、この反作用トルクを妨げる方向に反力 F_{pr} がはたらく。これによりローターのみが無限回転を行うことができる。また、ローターの車輪も同様に回転を妨げる方向に配管内壁面から反力 F_{pr} を受ける。しかし、ローターの車輪は傾いているため、図 2.2(b) のように配管内壁面から受ける反力の内、車輪の接線方向の力 $F_{pf} \cos \alpha$ は車輪の回転へと伝わる。そのため、残った力 $F_{pf} \sin \alpha$ が車輪の回転方向に対して垂直な向きにはたらく、車輪のスラスト方向への滑りを抑制する役割を果たす。

次に、螺旋駆動型配管検査ロボットのローターの回転角度と移動距離の関係を定義する。まず、3次元空間におけるローターの回転を図 2.3 のようにベクトル \mathbf{R}_p を用いて表す。ベクトル \mathbf{R}_p は座標系の原点を回転中心とし、Z 軸周り正の向き

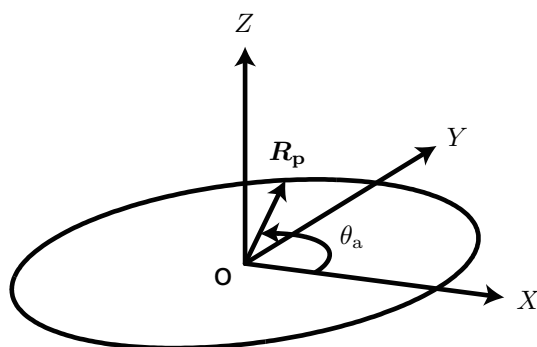


図 2.3: Rotational vector of the screw-driving pipe inspection robot

に回転するものとする. このとき \mathbf{R}_p は,

$$\mathbf{R}_p = \begin{bmatrix} R_p \cos \theta_a \\ R_p \sin \theta_a \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

と表すことができる. ここで, 図 2.4 のように, XYZ 空間においてベクトル \mathbf{R}_p が回転しながら Z 軸方向に直線移動する場合を考える. 図 2.5 に示すようにベクトル \mathbf{R}_p が $\Delta\theta_a$ だけ回転するとき, 円弧の長さは $R_p\Delta\theta_a$ となる. 車輪には傾き角が設けられているため, Z 軸方向の移動距離は $R_p\Delta\theta_a \tan \alpha$ と表わすことができる.

よって, ベクトル \mathbf{R}_p が θ_a だけ回転するときの Z 軸方向の移動距離は $R_p\theta_a \tan \alpha$ と表すことができる. このとき螺旋ベクトル \mathbf{H} は以下のように定義することができる.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} R_p \cos \theta_a \\ R_p \sin \theta_a \\ R_p\theta_a \tan \alpha \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

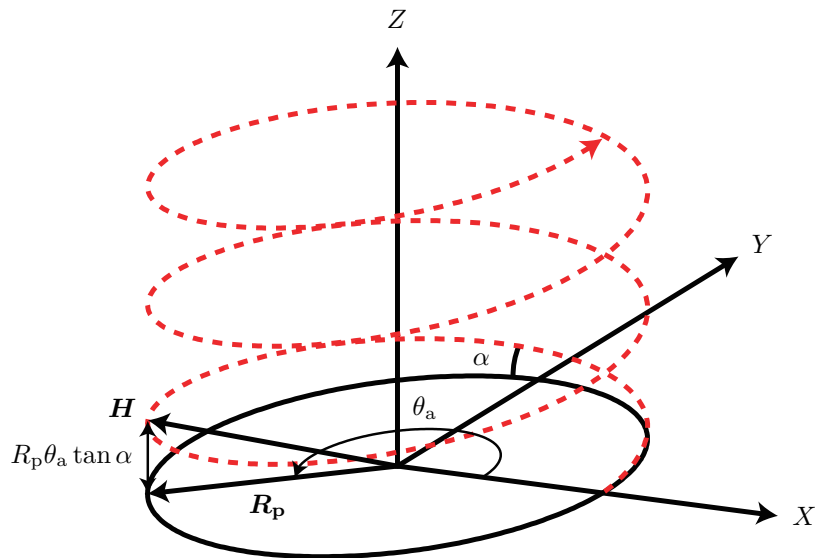


図 2.4: Straight-line motion of the screw-driving pipe inspection robot

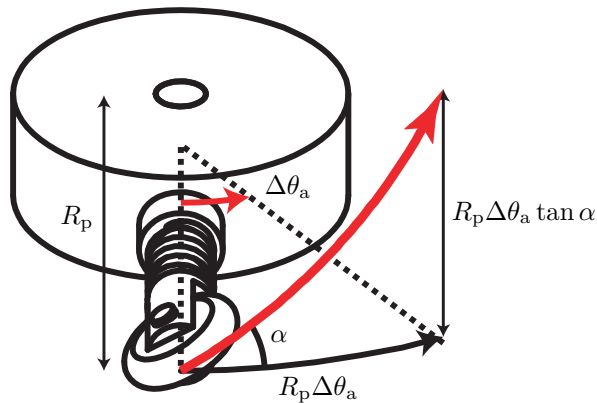


図 2.5: Geometric relationship of the screw-driving pipe inspection robot

また，螺旋駆動の移動速度 v_z は，直線移動距離 $R_p \theta_a \tan \alpha$ を時間で微分することにより以下のように求められる．

$$v_z = R_p \dot{\theta}_a \tan \alpha \quad (2.3)$$

この一連の手順により，回転角度 θ_a を用いて螺旋駆動の位置と速度を表すことができる．

2.2 3モジュール型の移動原理

次に3モジュール型配管検査ロボットの移動原理について解説する．3モジュール型配管検査ロボットは図2.6のように，120°間隔で放射状に配置された3つの駆動モジュールと中央モジュールによって構成されている．中央モジュールと各モジュールの間にはリンク機構やバネを用いた伸縮機構が備わっており，モジュールが配管内壁面を受動的に押し付けられるようになっている．そのため，各モジュールは配管内壁面から常に垂直抗力を受けている．この状態でモジュールを駆動させると推進力が発生し，ロボットは配管内を移動することができる．すべてのモジュールを同じ速度で制御するとロボットは前進や後退を行い，異なる速度で制御するとロボットは旋回を行うことができる．この旋回時の動作を定義するため，次に各モジュールの速度とロボットの動作の関係を運動学を用いて明らかにする．

3モジュール型配管検査ロボットはそれぞれのモジュールで独立した速度を発生させることができるため，図2.7の運動学モデルに基づき，互いに平行な速度ベクトル \mathbf{v}_1 ， \mathbf{v}_2 ， \mathbf{v}_3 を用いてロボットの並進速度と角速度を求めることができる．運動学モデルに基づく手法は文献[20]でも既に紹介されているが，モジュール毎にモデルを立てて式を導出している．そこで，本論文では3つのモジュールに共通するモデルを立てて運動学の関係式を導出する手法を用いる．

まず，速度ベクトル \mathbf{v}_1 ， \mathbf{v}_3 ，及びその中間に発生する \mathbf{v}_{13} を考える．速度ベクトル \mathbf{v}_1 と \mathbf{v}_3 が同じ大きさであれば \mathbf{v}_{13} も同じ大きさとなり，発生すべき動作は並進移動となる．しかし，速度ベクトル \mathbf{v}_1 と \mathbf{v}_3 の大きさが異なる場合，必ずどこかを

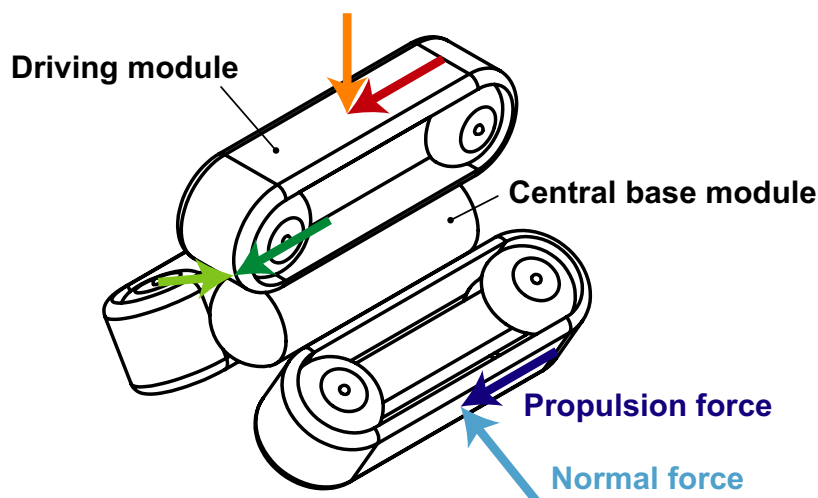


図 2.6: Structure of the three modular pipe inspection robot

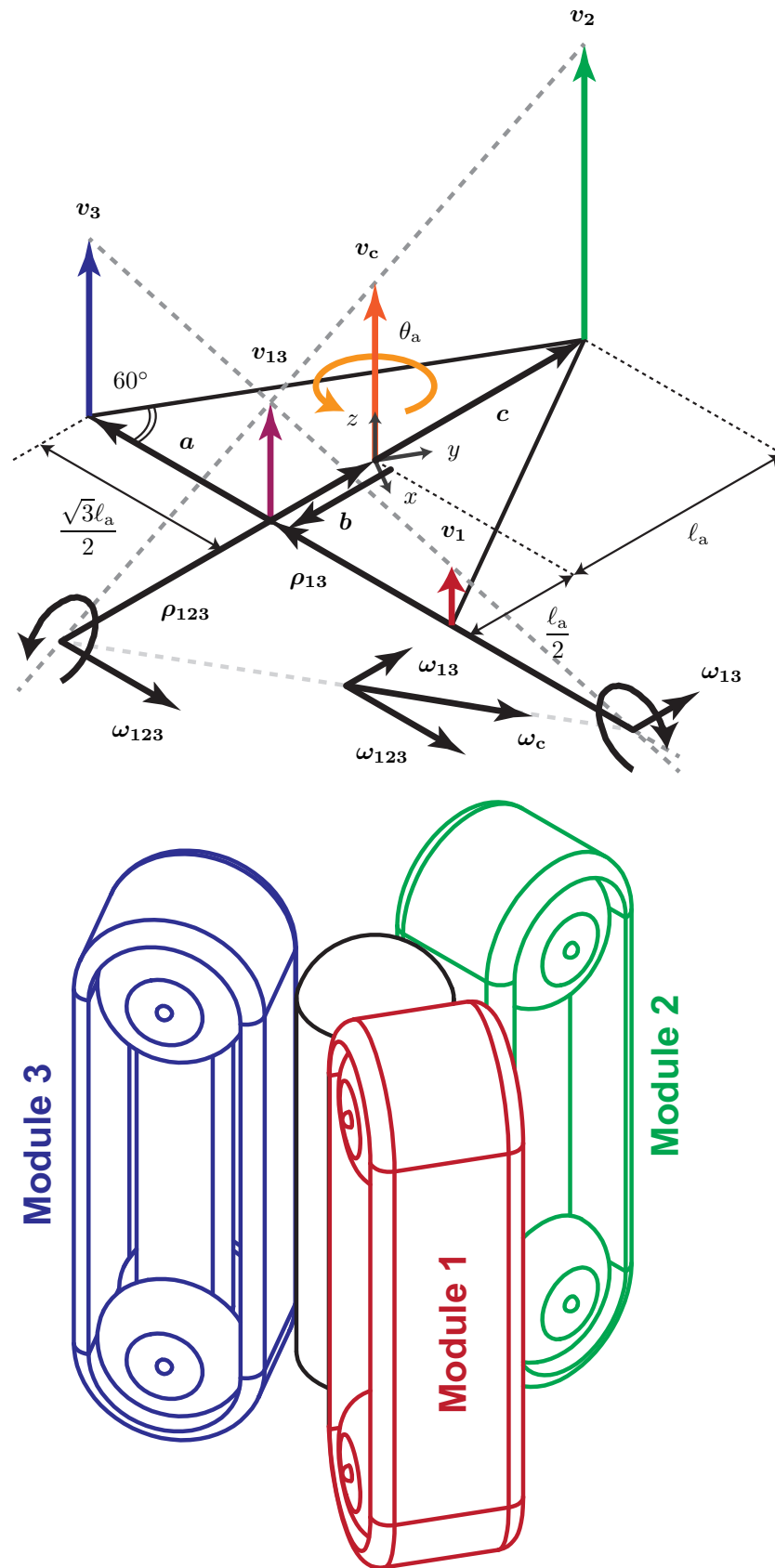


図 2.7: Kinematic model of the three modular pipe inspection robot

回転中心とした角速度ベクトル $\boldsymbol{\omega}_{13}$ が発生する。そのため、これら3つの速度ベクトル \boldsymbol{v}_1 , \boldsymbol{v}_3 , \boldsymbol{v}_{13} は回転中心からそれぞれの速度ベクトルの始点まで伸ばした曲率半径ベクトルを用いて以下のように外積で表すことができる。

$$\boldsymbol{v}_1 = \boldsymbol{\omega}_{13} \times (\boldsymbol{\rho}_{13} - \boldsymbol{a}) \quad (2.4)$$

$$\boldsymbol{v}_3 = \boldsymbol{\omega}_{13} \times (\boldsymbol{\rho}_{13} + \boldsymbol{a}) \quad (2.5)$$

$$\boldsymbol{v}_{13} = \boldsymbol{\omega}_{13} \times \boldsymbol{\rho}_{13} \quad (2.6)$$

次に、速度ベクトル \boldsymbol{v}_2 が発生した場合について考える。速度ベクトル \boldsymbol{v}_1 , \boldsymbol{v}_3 に加えて速度ベクトル \boldsymbol{v}_2 が生じると、 \boldsymbol{v}_2 と \boldsymbol{v}_{13} の大きさの違いによって $\boldsymbol{\omega}_{13}$ とは別の角速度ベクトル $\boldsymbol{\omega}_{123}$ が発生することになる。このとき、ロボットの中心にはたらく速度ベクトルを \boldsymbol{v}_c とおくと、それぞれの速度ベクトル \boldsymbol{v}_{13} , \boldsymbol{v}_2 , \boldsymbol{v}_c は、曲率半径ベクトルを用いて以下のように外積で表すことができる。

$$\boldsymbol{v}_{13} = \boldsymbol{\omega}_{123} \times (\boldsymbol{\rho}_{123} + \boldsymbol{b}) \quad (2.7)$$

$$\boldsymbol{v}_2 = \boldsymbol{\omega}_{123} \times (\boldsymbol{\rho}_{123} + \boldsymbol{c}) \quad (2.8)$$

$$\boldsymbol{v}_c = \boldsymbol{\omega}_{123} \times \boldsymbol{\rho}_{123} \quad (2.9)$$

それぞれのベクトルの成分は幾何学的関係から、

$$\boldsymbol{a} = \frac{\sqrt{3}l_a}{2} \begin{bmatrix} \sin 210^\circ \\ \cos 210^\circ \\ 0 \end{bmatrix} = -\frac{\sqrt{3}l_a}{4} \begin{bmatrix} \sqrt{3} \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\boldsymbol{b} = \frac{l_a}{2} \begin{bmatrix} \sin 300^\circ \\ \cos 300^\circ \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{l_a}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ -\sqrt{3} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$\boldsymbol{c} = l_a \begin{bmatrix} \sin 120^\circ \\ \cos 120^\circ \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{l_a}{2} \begin{bmatrix} -1 \\ \sqrt{3} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\boldsymbol{\rho}_{13} = \rho_{13} \begin{bmatrix} \sin 210^\circ \\ \cos 210^\circ \\ 0 \end{bmatrix} = -\frac{\rho_{13}}{2} \begin{bmatrix} \sqrt{3} \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$\boldsymbol{\rho}_{123} = \rho_{123} \begin{bmatrix} \sin 120^\circ \\ \cos 120^\circ \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{\rho_{123}}{2} \begin{bmatrix} -1 \\ \sqrt{3} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$\boldsymbol{\omega}_{13} = \omega_{13} \begin{bmatrix} \sin 120^\circ \\ \cos 120^\circ \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{\omega_{13}}{2} \begin{bmatrix} -1 \\ \sqrt{3} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$\boldsymbol{\omega}_{123} = \omega_{123} \begin{bmatrix} \sin 30^\circ \\ \cos 30^\circ \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{\omega_{123}}{2} \begin{bmatrix} \sqrt{3} \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$\mathbf{v}_1 = v_1 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$\mathbf{v}_2 = v_2 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$\mathbf{v}_3 = v_3 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$\mathbf{v}_{13} = v_{13} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$\mathbf{v}_c = v_c \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

のように与えられる.

式(2.10), (2.13), (2.15)を式(2.4), (2.5), (2.6)に代入すると,

$$v_1 = \left(\rho_{13} - \frac{\sqrt{3}l_a}{2} \right) \omega_{13} \quad (2.22)$$

$$v_3 = \left(\rho_{13} + \frac{\sqrt{3}l_a}{2} \right) \omega_{13} \quad (2.23)$$

$$v_{13} = \rho_{13}\omega_{13} \quad (2.24)$$

が求められる. 式(2.22)及び(2.23)から l_a を消去し, 式(2.24)に代入すると,

$$v_{13} = \frac{v_1 + v_3}{2} \quad (2.25)$$

が得られ, 同様に式(2.22)及び(2.23)から ρ_{13} を消去すると,

$$\omega_{13} = \frac{\sqrt{3}(v_3 - v_1)}{3l_a} \quad (2.26)$$

が得られる. この式(2.26)を式(2.24)に代入すると,

$$\rho_{13} = \frac{\sqrt{3}l_a(v_1 + v_3)}{2(v_3 - v_1)} \quad (2.27)$$

が得られる.

さらに, 式(2.11), (2.12), (2.14), (2.16)を式(2.7), (2.8), (2.9)に代入すると,

$$v_{13} = \left(\rho_{123} - \frac{l_a}{2} \right) \omega_{123} \quad (2.28)$$

$$v_2 = (\rho_{123} + l_a) \omega_{123} \quad (2.29)$$

$$v_c = \rho_{123}\omega_{123} \quad (2.30)$$

が求められる。式(2.28)及び(2.29)から l_a を消去し、式(2.30)に代入すると、

$$v_c = \frac{v_1 + v_2 + v_3}{3} \quad (2.31)$$

が得られる。この結果は3モジュール型配管検査ロボットの並進速度が3つのモジュールの速度の平均値となることを意味している。同様に式(2.28)及び(2.29)から ρ_{123} を消去すると、

$$\omega_{123} = \frac{-v_1 + 2v_2 - v_3}{3l_a} \quad (2.32)$$

が得られる。この式(2.32)を式(2.30)に代入すると、

$$\rho_{123} = \frac{l_a(v_1 + v_2 + v_3)}{-v_1 + 2v_2 - v_3} \quad (2.33)$$

が得られる。角速度ベクトル $\boldsymbol{\omega}_c$ は角速度ベクトル $\boldsymbol{\omega}_{13}$ と $\boldsymbol{\omega}_{123}$ の和で表されるため、以下のように導くことができる。

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\omega}_c &= \boldsymbol{\omega}_{13} + \boldsymbol{\omega}_{123} \\ &= \frac{1}{3l_a} \begin{bmatrix} 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ -2 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.34)$$

これにより、3つのモジュールに速度を与えたときロボットに生じる x 軸及び y 軸周りの角速度を求めることができる。

ここで、ロボットの角速度及び並進速度を

$$\boldsymbol{u} = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

とおき、各モジュールの速度を

$$\boldsymbol{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

とおくと、これらの関係はヤコビ行列 \boldsymbol{J} を用いて

$$\boldsymbol{u} = \boldsymbol{J}\boldsymbol{v} \quad (2.37)$$

で表すことができる。 \boldsymbol{J} の成分は式(2.31)及び(2.34)を用いて以下のように求めることができる。

$$\boldsymbol{J} = \frac{1}{3l_a} \begin{bmatrix} 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ -2 & 1 & 1 \\ l_a & l_a & l_a \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

このヤコビ行列は3つのモジュールが座標系 xyz に対して図2.7のように配置されている場合(v_1 が x 軸上に存在するとき)でのみ用いることができ、 z 軸周りに回

転が生じた場合では用いることができない。これを解決するためには z 軸周りに角度 θ_a 回転させたときの回転変換行列 \mathbf{T}_{θ_a} をヤコビ行列にかければ良い。よって z 軸周りの回転を考慮したヤコビ行列 \mathbf{J}_{θ_a} は、

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_{\theta_a} &= \mathbf{T}_{\theta_a} \mathbf{J} \\ &= \frac{1}{3l_a} \begin{bmatrix} 2 \sin \theta_a & \sqrt{3} \cos \theta_a - \sin \theta_a & -\sqrt{3} \cos \theta_a - \sin \theta_a \\ -2 \cos \theta_a & \sqrt{3} \sin \theta_a + \cos \theta_a & -\sqrt{3} \sin \theta_a + \cos \theta_a \\ l_a & l_a & l_a \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.39)$$

で求められる。回転変換行列 \mathbf{T}_{θ_a} の各成分は

$$\mathbf{T}_{\theta_a} = \begin{bmatrix} \cos \theta_a & -\sin \theta_a & 0 \\ \sin \theta_a & \cos \theta_a & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

で与えられる。ヤコビ行列 \mathbf{J}_{θ_a} の逆ヤコビ行列 $\mathbf{J}_{\theta_a}^{-1}$ は、

$$\mathbf{J}_{\theta_a}^{-1} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2l_a \sin \theta_a & -2l_a \cos \theta_a & 2 \\ -l_a(\sin \theta_a - \sqrt{3} \cos \theta_a) & l_a(\cos \theta_a + \sqrt{3} \sin \theta_a) & 2 \\ -l_a(\sin \theta_a + \sqrt{3} \cos \theta_a) & l_a(\cos \theta_a - \sqrt{3} \sin \theta_a) & 2 \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

となる。

ロボットを実際に制御する際、各モジュールの並進速度 v_1, v_2, v_3 は車輪の半径 R_w を用いてそれぞれ

$$v_1 = R_w \dot{\theta}_{w1} \quad (2.42)$$

$$v_2 = R_w \dot{\theta}_{w2} \quad (2.43)$$

$$v_3 = R_w \dot{\theta}_{w3} \quad (2.44)$$

で表すことができる。よって以上をまとめると、ロボットの目標動作(角速度 ω_x, ω_y , 並進速度 v_c)を入力として与えたときの各モジュールが発生すべき回転速度 $\dot{\theta}_{w1}, \dot{\theta}_{w2}, \dot{\theta}_{w3}$ が求められる。

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_{w1} \\ \dot{\theta}_{w2} \\ \dot{\theta}_{w3} \end{bmatrix} = \frac{1}{2R_w} \begin{bmatrix} 2l_a \sin \theta_a & -2l_a \cos \theta_a & 2 \\ l_a(\sqrt{3} \cos \theta_a + \sin \theta_a) & l_a(\cos \theta_a + \sqrt{3} \sin \theta_a) & 2 \\ -l_a(\sqrt{3} \cos \theta_a + \sin \theta_a) & l_a(\cos \theta_a - \sqrt{3} \sin \theta_a) & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

2.3 まとめ

本章では、螺旋駆動型配管検査ロボット及び3モジュール型配管検査ロボットの移動原理について述べた。螺旋駆動型配管検査ロボットの移動原理では、ローテーターの回転の反作用をステーターが支え、また、同時に車輪の傾きが力の向きを変えることによって前進できることを示した。3モジュール型配管検査ロボットの移動原理では、3つのモジュールが干渉し合うことによってロボット全体に与える影響を運動学モデルから導き、ロボットの速度とそれぞれのモジュールの速度の関係を定式化した。

第3章

曲管内及びT字管内走行の基礎理論

ロボットが直管内を直進する場合、配管内の空間は円柱状になるため、設計時には配管の内径とロボットの直径の関係だけを考慮すれば良く、ロボットの長さはあまり問題にならない。しかし、ロボットが曲管やT字管を走行する場合、配管内の空間は3次的に複雑に変化するため、ロボットの直径が足りなければ滑って十分な推進力が得られず、全長が空間の制限を超えるほど長ければ方向転換を行うことができない。そのため、走行とともに変化する配管内の空間とその中で拡張したときのロボットの直径や長さを考慮し、方向転換のタイミングやアクチュエータの速度を制御しなければならない。そこで本章では、曲管及びT字管走行に必要な要素をそれぞれの配管内の空間やロボットの特徴を基に論ずる。

3.1 曲管内走行の基礎理論

曲管は経路が連続しており、配管検査ロボットは常に壁面と接触しながら移動することになる。このとき、ロボットの大きさは配管内の空間によって拘束されるため、自ずとその姿勢や経路が決まる。そのため、本節では曲管走行時のロボットの姿勢や経路を基に空間的な制約を求め、曲管走行に必要な要素について論ずる。

図3.1はロボットが直管1を通り曲管内を經由して直管2へ移動する際の重心の軌跡を表している。絶対座標系 XYZ の原点が曲管の曲率半径の中心にあるとき、ロ

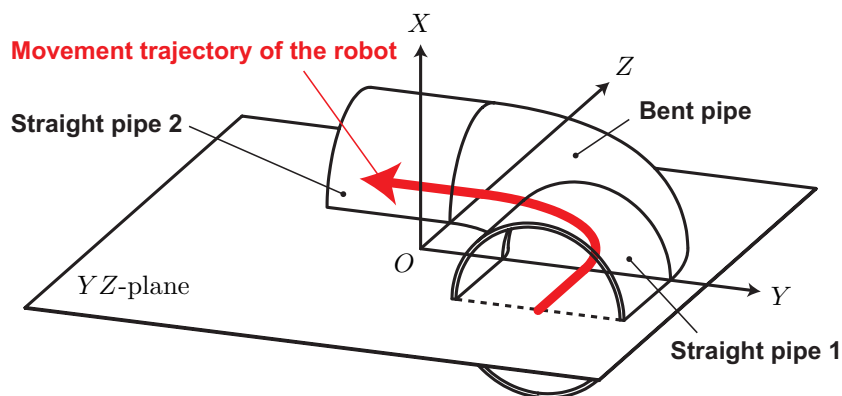


図 3.1: Movement trajectory of the robot while it passes through a bent pipe

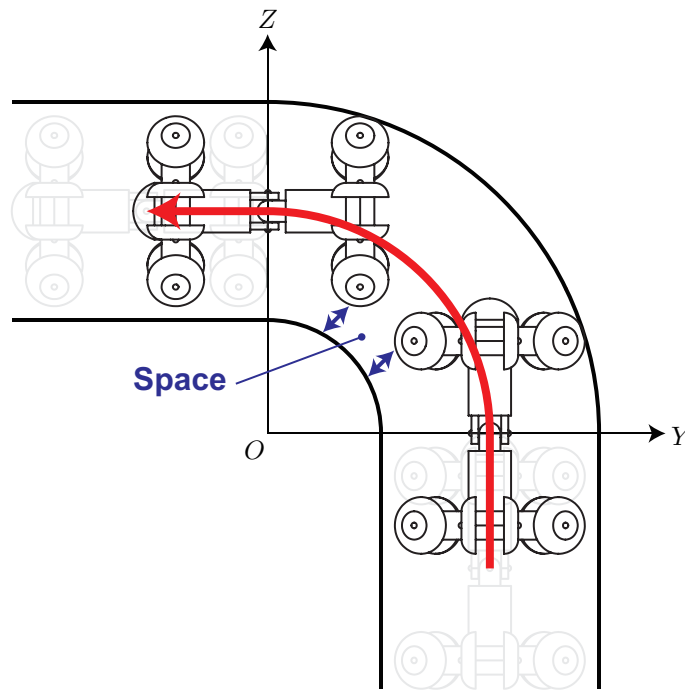


図 3.2: Unnatural movement in bent pipe

ロボットの重心の X 座標は常に YZ 平面上 ($X = 0$) に位置するのが望ましい。一方、ロボットの重心の Y 座標及び Z 座標は始めに直管 1 の中心線上にあったものが曲管を通過して直管 2 の中心線上へと移動しなくてはならない。このとき、最も容易に想像することができるロボット重心の軌跡は常に配管の中心線上を移動するものであるが、図 3.2 のように直管と曲管の連結部分において曲管の内側に不自然な空間ができてしまう。また、曲率を持たない直線状態から曲率を持つ曲線状態へと瞬間的に移った場合、ロボットは急激な角加速度を必要とするため、滑らかな動作を行うことができない。このような場合、ロボットの前方部分が曲管の外側で接触し、配管内壁面から反力を受けて内側へと徐々に傾いていく方が自然である。また、本論文で扱う配管検査ロボットはバネによる伸縮機構を備えているため、ロボット重心はすべてのバネが釣り合うような位置関係を維持することになる。そこで、ここでは YZ 平面上 ($X = 0$) を移動するロボットの移動距離とその重心の位置関係をバネの釣り合いと 2 次元幾何学モデルから導出し、それらを基に曲管内走行時の空間的制約へと展開する。

3.1.1 ロボットの重心軌道

螺旋駆動型の重心軌道

曲管は経路が連続しているため、配管の形状を利用して能動関節を使用せずにロボットを方向転換させることができる。そのため本論文では、能動関節を組み込まないモデルを用いてロボットの移動距離とその重心の位置関係を求める。図 3.3 に曲管内走行時の 2 次元幾何学モデルを示す。また、図中のパラメーターを表 3.1 のように定義する。ここでは、 ϕ_{f0} を入力値として変化させたときのロボット重心の位

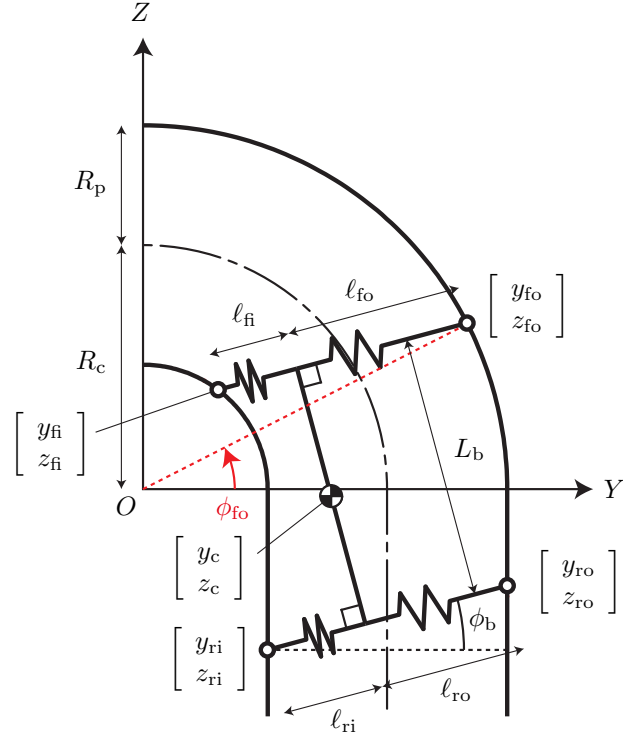


図 3.3: Two-dimensional geometric model in a bent pipe

表 3.1: Parameters of a two-dimensional geometric model

Radius of the straight and bent pipe	R_p
Radius of curvature of the bent pipe	R_c
Inner and outer arm length of the front unit	l_{fi}, l_{fo}
Inner and outer arm length of the rear unit	l_{ri}, l_{ro}
Length of robot	L_b
Y and Z-coordinate of the inner arm end of the front unit	y_{fi}, z_{fi}
Y and Z-coordinate of the outer arm end of the front unit	y_{fo}, z_{fo}
Y and Z-coordinate of the inner arm end of the rear unit	y_{ri}, z_{ri}
Y and Z-coordinate of the outer arm end of the rear unit	y_{ro}, z_{ro}
Y and Z-coordinate of the center of gravity	y_c, z_c
Body angle of the robot	ϕ_b
Turning angle of front outer arm	ϕ_{fo}
Roll angle of the robot	θ_a

置と姿勢を求めていく．まず初めに，ロボットと配管内壁面との接触点及びロボットの重心の座標は幾何学的関係から以下の式で与えられる．

$$\begin{bmatrix} y_{fo} \\ z_{fo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_c + R_p) \cos \phi_{fo} \\ (R_c + R_p) \sin \phi_{fo} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} y_{fi} \\ z_{fi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{fo} - (\ell_{fo} + \ell_{fi}) \cos \phi_b \\ z_{fo} - (\ell_{fo} + \ell_{fi}) \sin \phi_b \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\begin{bmatrix} y_{ro} \\ z_{ro} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{fo} - \ell_{fo} \cos \phi_b + L_b \sin \phi_b + \ell_{ro} \cos \phi_b \\ z_{fo} - \ell_{fi} \sin \phi_b - L_b \cos \phi_b + \ell_{ro} \sin \phi_b \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\begin{bmatrix} y_{ri} \\ z_{ri} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{fo} - \ell_{fo} \cos \phi_b + L_b \sin \phi_b - \ell_{ri} \cos \phi_b \\ z_{fo} - \ell_{fi} \sin \phi_b - L_b \cos \phi_b - \ell_{ri} \sin \phi_b \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\begin{bmatrix} y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{fo} - \ell_{fo} \cos \phi_b + \frac{L_b}{2} \sin \phi_b \\ z_{fo} - \ell_{fi} \sin \phi_b - \frac{L_b}{2} \cos \phi_b \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

次に拘束条件を考える．伸縮機構のバネが走行中に常に釣り合うためには，

$$\ell_{fo} = \ell_{fi} \quad (3.6)$$

$$\ell_{ro} = \ell_{ri} \quad (3.7)$$

が成り立たなくてはならない．このときの前部ユニットと後部ユニットの腕の長さをそれぞれ $\ell_f (= \ell_{fo} = \ell_{fi})$ 及び $\ell_r (= \ell_{ro} = \ell_{ri})$ とおく．また，ロボットと配管内壁面との接触点の座標はそれぞれが状況に応じて直線上や曲線上を移動するため

$$\begin{cases} y_{fi}^2 + z_{fi}^2 = (R_c - R_p)^2 & (y_{fi} \geq 0) \\ z_{fi} = R_c - R_p & (y_{fi} < 0) \end{cases} \quad (3.8)$$

$$\begin{cases} y_{ri}^2 + z_{ri}^2 = (R_c - R_p)^2 & (z_{ri} \geq 0) \\ y_{ri} = R_c - R_p & (z_{ri} < 0) \end{cases} \quad (3.9)$$

$$\begin{cases} y_{ro}^2 + z_{ro}^2 = (R_c + R_p)^2 & (z_{ro} \geq 0) \\ y_{ro} = R_c + R_p & (z_{ro} < 0) \end{cases} \quad (3.10)$$

を満たしていなければならない．

以上の式(3.2), (3.3), (3.4), (3.6), (3.7)を拘束条件の式(3.8), (3.9), (3.10)にそれぞれ代入することにより, ℓ_f , ℓ_r , ϕ_b を変数とする3元連立方程式が得られる．しかし, 3つの方程式がすべて1次方程式となる3元1次方程式とは異なり, 今回扱う方程式は三角関数や2次関数を含む非線形方程式となっているため, 解は容易に求めることができない．そこで本項ではニュートン・ラプソン法 [26] による求根アルゴリズムを用いて近似解の数値計算を行った．ここでは, $\phi_{fo} = 0$ のとき, 初期状態の拘束条件が $y_{fi} \geq 0$, $z_{ri} < 0$, $z_{ro} < 0$ となるため, この条件で処理を開始し, 各接触点の座標の変化とともに随時拘束条件を変えながら計算を行った．また, 解の初期値には $\ell_f = R_p$, $\ell_r = R_p$, $\phi_b = 0$ を用い, 配管の寸法には $R_p = 62.5$, $R_c = 140$ を用いた．

さて, ロボット本体が完全に曲管内に収まっている状態, すなわちすべての接触点が曲管を表す曲線上にある状態のとき, ロボットの重心は一定の曲率を保ったまま円弧上の軌跡を描くことになる．しかし, ロボットの軸方向の長さ (L_b) が曲管内に収まりきれない程大きくなった場合, 必ずいずれかの接触点が直線上を移動する

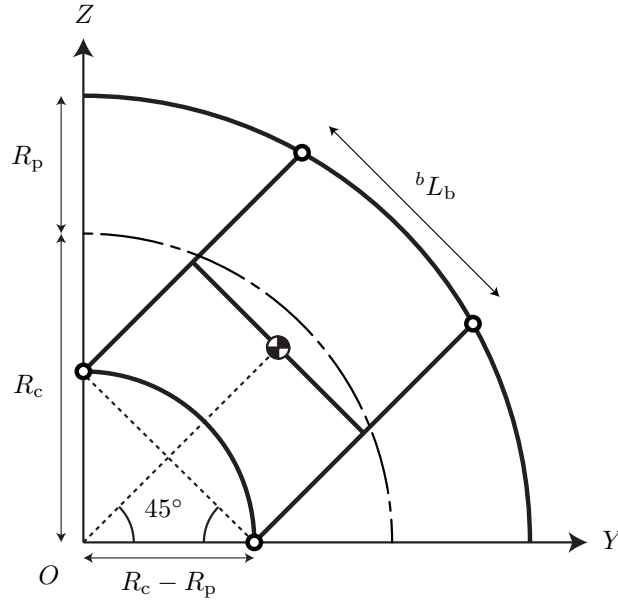


図 3.4: Boundary of the robot's axial length (screw-driving type)

ことになる．この L_b の境界値は図 3.4 に示すように $\phi_b = 45^\circ$ のときの状態によって定まり，幾何学的関係から

$${}^bL_b = \sqrt{2}(R_c - R_p) \quad (3.11)$$

として求めることができる．これに解析で用いる配管の寸法を代入すると bL_b は約 109.6 となった．そのため，本論文では $L_b \leq {}^bL_b$ の条件として $L_b = 80$ を， $L_b > {}^bL_b$ の条件として $L_b = 140$ を用い，これら 2 種類の条件で解析を行った．

図 3.5 (a) に $L_b = 80 (0 \leq \phi_{fo} < 60^\circ)$ のときの結果を，図 3.5 (b) に $L_b = 140 (0 \leq \phi_{fo} < 60^\circ)$ のときの結果をそれぞれ示す．ここで重要となるのは，ロボットの移動距離に対して重心座標 y_c ， z_c 及び姿勢角 ϕ_b がどのように変化するかであり，次にこれらの関係を導いていく．

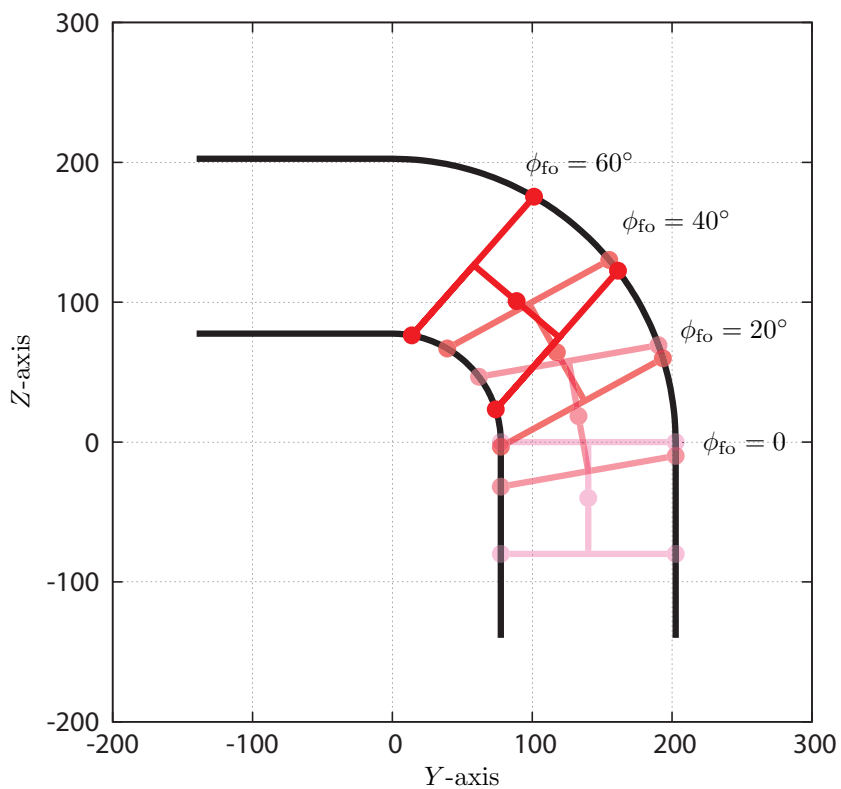
曲管により接続された 2 つの直管は互いに直角であり，これらの経路はちょうど直線 $Z = Y$ に対して対称となる．そのため， ϕ_{fo} を入力値として与えたときの重心座標は $\phi_b = 45^\circ$ を基準に以下のように定義することができる．

$$\begin{bmatrix} y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{cases} \begin{bmatrix} y_c \\ z_c \end{bmatrix} & (\phi_b < 45^\circ) \\ \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_c \\ z_g \end{bmatrix} & (\phi_b \geq 45^\circ) \end{cases} \quad (3.12)$$

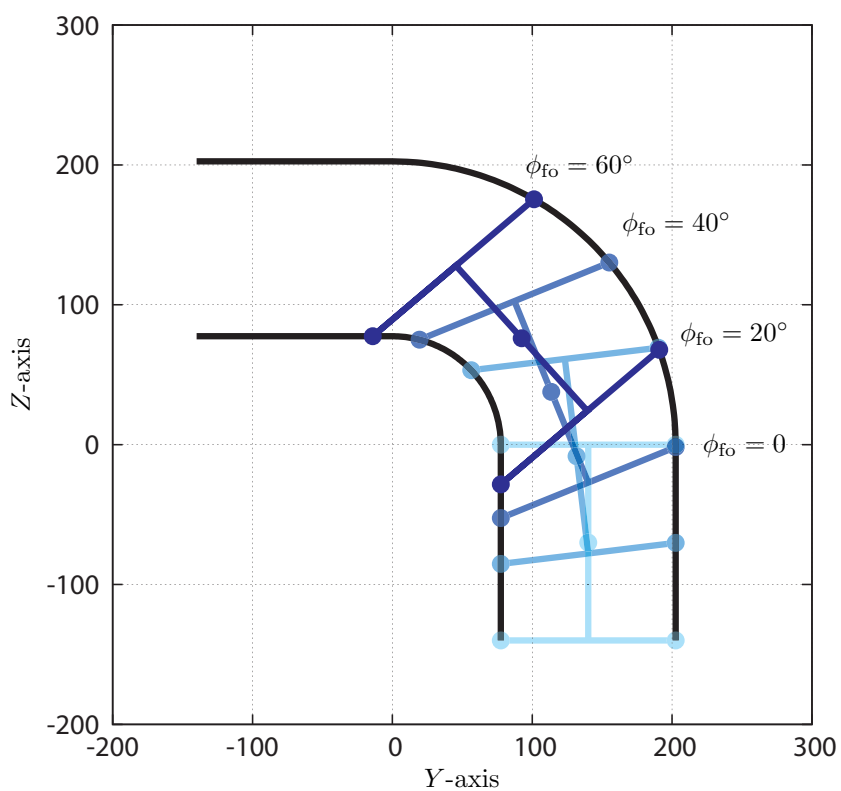
これにより，直線 $Z = Y$ に対して対称な座標を求めることができる．図 3.6 にロボットの重心の軌跡を示す．描画した結果から， L_b が大きいほど，より曲管の内側へロボットの重心の座標が移動することがわかる．

また，微小区間において以下の式が成り立つため，ロボットの重心の移動距離 D はこれを積分することによって求めることができる．

$$dD = \sqrt{dy_c^2 + dz_c^2} \quad (3.13)$$



(a) When $L_b = 80$



(b) When $L_b = 140$

図 3.5: Calculation result of the 2D model (screw-driving type)

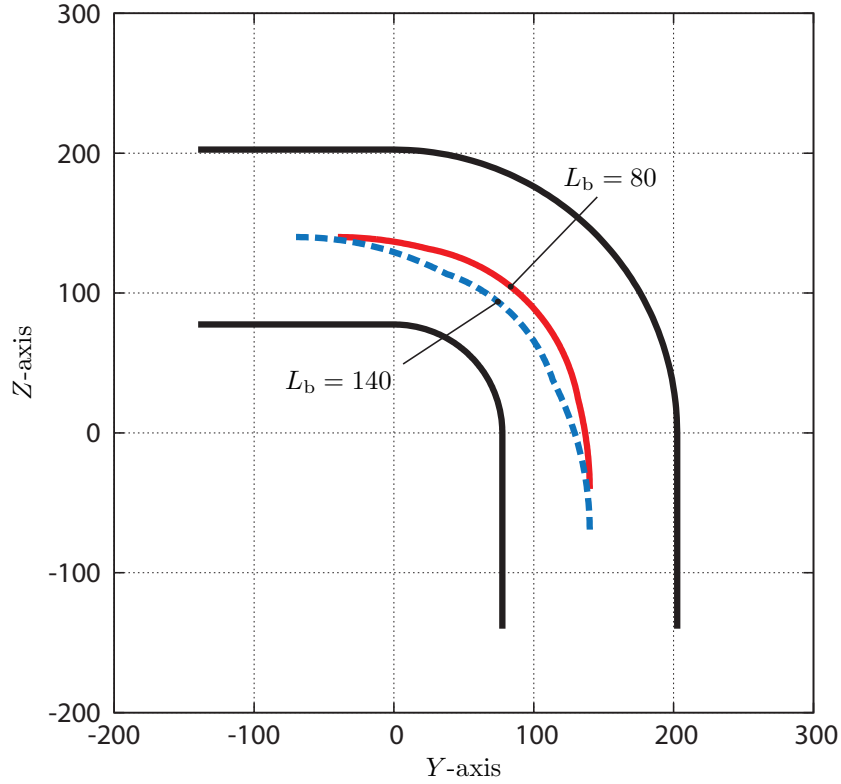


図 3.6: Trajectory of center of the screw-driving type

この移動距離 D と Y 座標及び Z 座標の関係を $L_b = 80$ の場合と $L_b = 140$ の場合で描画すると図 3.7 のようになる．これらは最小二乗法を用いて近似曲線を求めることができ、移動距離 D とロボット重心の Y 座標の関係は

$$y_c = \begin{cases} a_{y_{c1}} D^4 - b_{y_{c1}} D^3 - c_{y_{c1}} D^2 - d_{y_{c1}} D + e_{y_{c1}} & (L_b = 80) \\ a_{y_{c2}} D^3 - b_{y_{c2}} D^2 + c_{y_{c2}} D + d_{y_{c2}} & (L_b = 140) \end{cases} \quad (3.14)$$

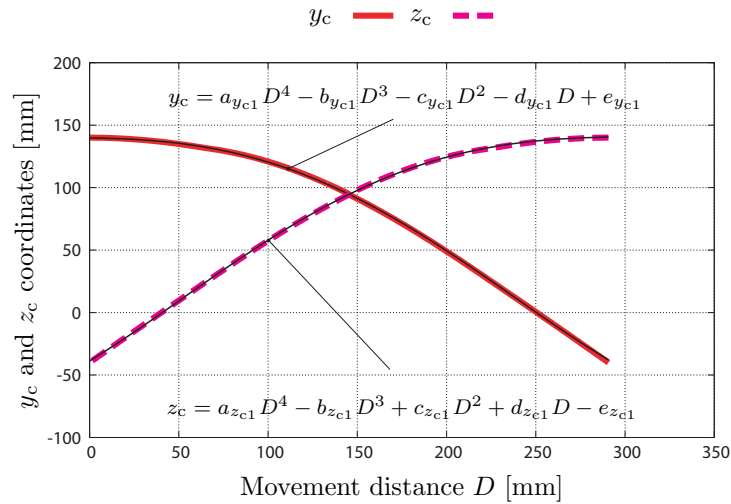
で表すことができる．このときのそれぞれの係数は、 $a_{y_{c1}} = 0.00000003 \times 10^{-8}$ 、 $b_{y_{c1}} = 1.344 \times 10^{-5}$ 、 $c_{y_{c1}} = 6.4478 \times 10^{-4}$ 、 $d_{y_{c1}} = 2.515285 \times 10^{-2}$ 、 $e_{y_{c1}} = 139.81597618$ 、 $a_{y_{c2}} = 2.29 \times 10^{-6}$ 、 $b_{y_{c2}} = 2.92866 \times 10^{-3}$ 、 $c_{y_{c2}} = 9.839338 \times 10^{-2}$ 、 $d_{y_{c2}} = 137.56283256$ となった．同様に、移動距離 D とロボット重心の Z 座標の関係は

$$z_c = \begin{cases} a_{z_{c1}} D^4 - b_{z_{c1}} D^3 + c_{z_{c1}} D^2 + d_{z_{c1}} D - e_{z_{c1}} & (L_b = 80) \\ -a_{z_{c2}} D^3 - b_{z_{c2}} D^2 + c_{z_{c2}} D - d_{z_{c2}} & (L_b = 140) \end{cases} \quad (3.15)$$

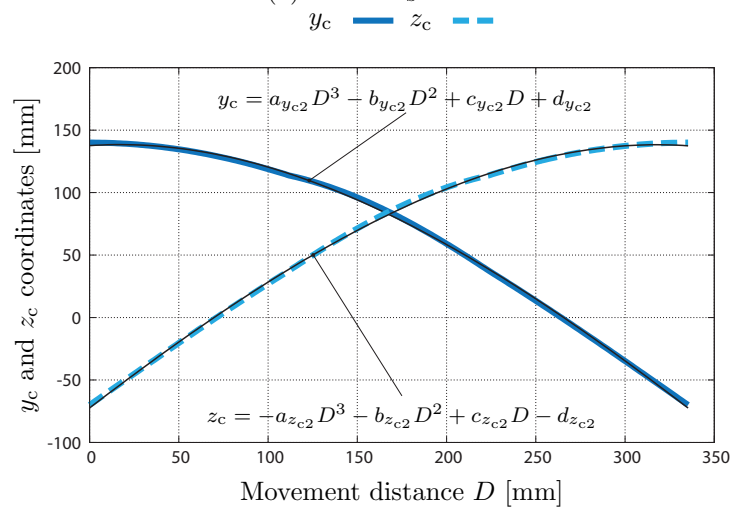
で表すことができる．このときのそれぞれの係数は、 $a_{z_{c1}} = 3 \times 10^{-8}$ 、 $b_{z_{c1}} = 2.133 \times 10^{-5}$ 、 $c_{z_{c1}} = 2.79527 \times 10^{-3}$ 、 $d_{z_{c1}} = 8.6938401 \times 10^{-1}$ 、 $e_{z_{c1}} = 38.68261233$ 、 $a_{z_{c2}} = 2.33 \times 10^{-6}$ 、 $b_{z_{c2}} = 6.0431 \times 10^{-4}$ 、 $c_{z_{c2}} = 1.09016849$ 、 $d_{z_{c2}} = 72.32227213$ となった．

さらに、移動距離 D とロボットの姿勢角 ϕ_b の関係を $L_b = 80$ の場合と $L_b = 140$ の場合で描画すると図 3.8 のようになる．これらの値も最小二乗法を用いると、

$$\phi_b = \begin{cases} -a_{\phi_{b1}} D^3 + b_{\phi_{b1}} D^2 + c_{\phi_{b1}} D & (L_b = 80) \\ -a_{\phi_{b2}} D^3 + b_{\phi_{b2}} D^2 - c_{\phi_{b2}} D & (L_b = 140) \end{cases} \quad (3.16)$$



(a) When $L_b = 80$



(b) When $L_b = 140$

図 3.7: y_c and z_c coordinates of the screw-driving type

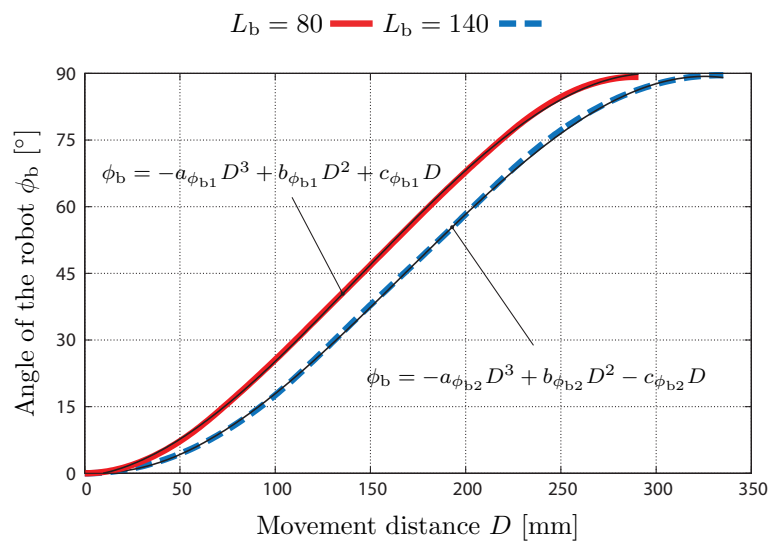


図 3.8: Orientation angle of the screw-driving robot ϕ_b with respect to D

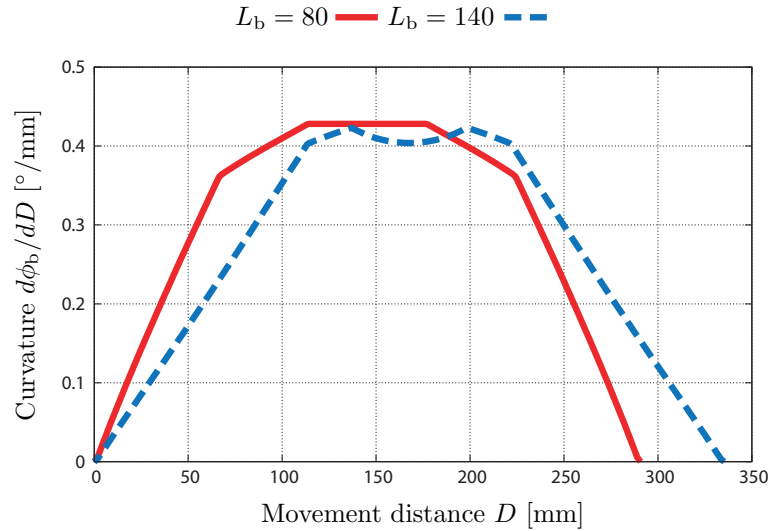


図 3.9: Derivative of ϕ_b with respect to D in case of the screw-driving type

として近似曲線で表すことができる。それぞれの係数は、 $a_{\phi_{b1}} = 6.6 \times 10^{-6}$, $b_{\phi_{b1}} = 2.8948 \times 10^{-4}$, $c_{\phi_{b1}} = 2.758134 \times 10^{-2}$, $a_{\phi_{b2}} = 5.54 \times 10^{-6}$, $b_{\phi_{b2}} = 2.77838 \times 10^{-3}$, $c_{\phi_{b2}} = 4.259193 \times 10^{-2}$ となった。

ここで重要となる要素は移動距離 D に対するロボットの姿勢角 ϕ_b の変化量であり、これは ϕ_b を D で微分した値、すなわち曲率 $d\phi_b/dD$ となる。得られた曲率を図 3.9 に示す。図からわかるように、ロボットが直管内から曲管内へとちょうど移り変わる状態、あるいはその逆の状態(曲管から直管)では曲率が移動距離 D に対して一定の傾きで変化するため $L_b = 80$ と $L_b = 140$ のいずれの場合も線形となる。その後、ロボット外側後部の接触点 $[y_{ro} \ z_{ro}]^T$ が曲管の外側へ移動した際に傾きの大きさは変化するが線形性は保ったままとなる。このように曲率 $d\phi_b/dD$ が移動距離 D に対して線形となる場合、ロボットの重心の軌道はクロソイド曲線となる。クロソイド曲線は道路の緩和曲線として実社会でもよく応用されており、この曲線を用いて曲率を持たない直線軌道と一定の曲率を持つ曲線軌道を滑らかに結ぶことができる [25]。一方、 $\phi_b = 45^\circ$ 付近では $L_b = 80$ の場合、ロボットが曲管内に完全に収まるため曲率は一定となり、これは円弧に一致する。しかし、 $L_b = 140$ の場合、必ずいずれかの接触点が常に直線上を移動しているため、曲率は複雑な動きをすることになる。

3 モジュール型の重心軌道

次に 3 モジュール型配管検査ロボットの重心軌道について論ずる。3 モジュール型は螺旋駆動型とは異なり、ロボット中央部と曲管の内側が常に接触しながら曲管走行を行う。そのため、ロボットの大きさは図 3.10 に示すような長方形モデルによって表すことができる。このときロボットの向きは常に曲管内側の接線方向を向くため、螺旋駆動型とは異なり、満たすべき条件は式 (3.10) のみとなる。よって、図 3.10 (a) と図 3.10 (b) の 2 つの状況を考慮するだけで数値計算を用いることなく容易に軌道を推定することができる。

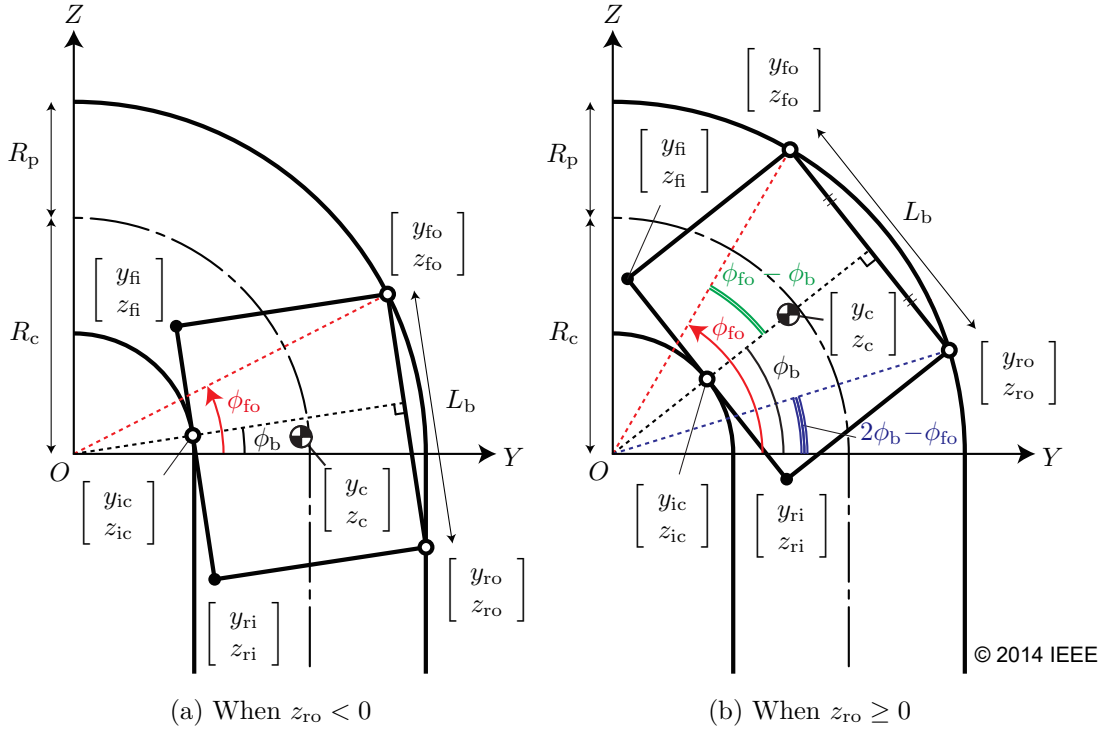


図 3.10: Rectangle model in a bent pipe

まず、曲管外側と曲管内側の軌道上を移動する接触点の座標は、

$$\begin{bmatrix} y_{fo} \\ z_{fo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_c + R_p) \cos \phi_{fo} \\ (R_c + R_p) \sin \phi_{fo} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\begin{bmatrix} y_{ic} \\ z_{ic} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_c - R_p) \cos \phi_b \\ (R_c - R_p) \sin \phi_b \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

で表すことができ、 z_{ro} の条件によってロボット後部外側の座標は以下のように定義できる。

$$\begin{bmatrix} y_{ro} \\ z_{ro} \end{bmatrix} = \begin{cases} \begin{bmatrix} R_c + R_p \\ z_{fo} - L_b \cos \phi_b \end{bmatrix} & (z_{ro} < 0) \\ \begin{bmatrix} (R_c + R_p) \cos(2\phi_b - \phi_{fo}) \\ (R_c + R_p) \sin(2\phi_b - \phi_{fo}) \end{bmatrix} & (z_{ro} \geq 0) \end{cases} \quad (3.19)$$

y_{ic} 及び z_{ic} はそれぞれ長方形と曲管内側の接触点の Y 座標と Z 座標を表している。

また、長方形内側の角の座標 $[y_{fi} \ z_{fi}]^T$ と $[y_{ri} \ z_{ri}]^T$ は、それぞれ直線 $z = \tan \phi_b (y - y_{fo}) + z_{fo}$ と $z = \tan(\phi_b + 90^\circ)(y - y_{ic}) + z_{ic}$ の接点及び直線 $z = \tan \phi_b (y - y_{ro}) + z_{ro}$ と $z = \tan(\phi_b + 90^\circ)(y - y_{ic}) + z_{ic}$ の接点であるため、これらを導出すると、

$$\begin{bmatrix} y_{fi} \\ z_{fi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{\sin 2\phi_b} \left\{ y_{fo} \tan \phi_b + \frac{R_c - R_p}{\sin \phi_b} - z_{fo} \right\} \\ (y_{fi} - y_{fo}) \tan \phi_b + z_{fo} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$\begin{bmatrix} y_{ri} \\ z_{ri} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{\sin 2\phi_b} \left\{ y_{ro} \tan \phi_b + \frac{R_c - R_p}{\sin \phi_b} - z_{ro} \right\} \\ (y_{ri} - y_{ro}) \tan \phi_b + z_{ro} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

となる．幾何学的関係からロボットの姿勢角 ϕ_b は $z_{ro} < 0$ と $z_{ro} \geq 0$ の異なる条件下で以下のように求めることができる．

$$\phi_b = \sin^{-1} \frac{y_{ro} - y_{fo}}{L_b} \quad (z_{ro} < 0) \quad (3.22)$$

$$\phi_b = \phi_{fo} - \sin^{-1} \frac{L_b}{2(R_c + R_p)} \quad (z_{ro} \geq 0) \quad (3.23)$$

これらの計算結果を図 3.11 に示す．配管の寸法には $R_p = 100$ ， $R_c = 200$ を用いた．

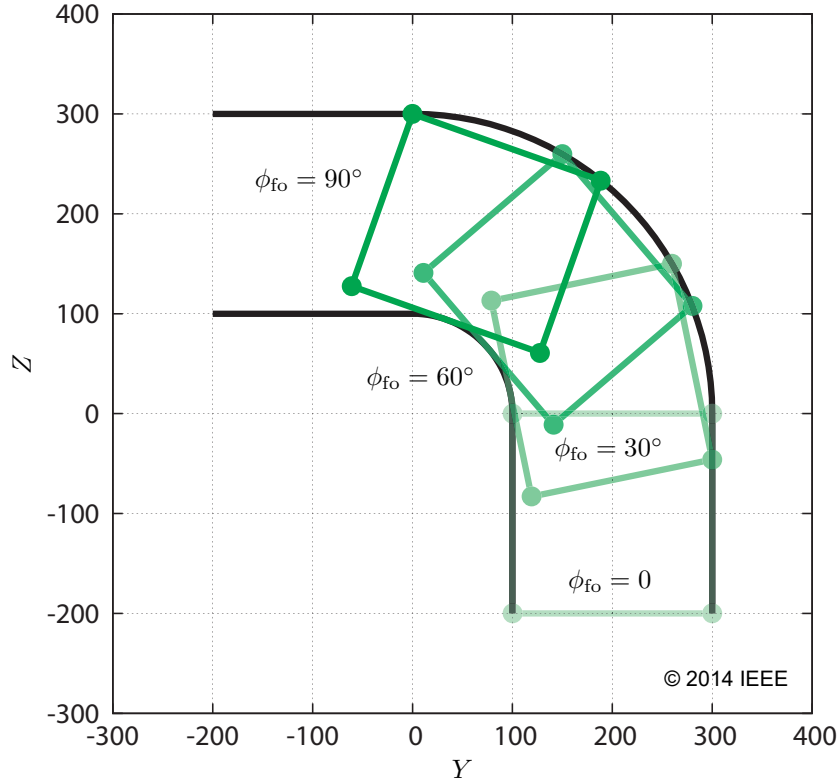


図 3.11: Calculation result of the rectangle model

なお，ここで螺旋駆動型のとくと同様に，すべての接触点が曲管を表す曲線上にあるときとそうでないときを考慮すると，その境目は図 3.12 のようになる．このとき L_b の境界値は $\phi_b = 45^\circ$ のときの状態によって定まり，幾何学的関係から

$${}^b L_b = \sqrt{2}(R_c + R_p) \quad (3.24)$$

で求められる．しかし，このような場合，実際にはロボットの直径が極端に縮まなければならず現実的ではない．そのため，本項では $L_b < {}^b L_b$ となる値のみを用いることにする ($L_b = 200$)．

ロボットの重心座標は以下の式で表すことができる．

$$\begin{bmatrix} y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(y_{fo} + y_{ri})}{2} \\ \frac{(z_{fo} + z_{ri})}{2} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

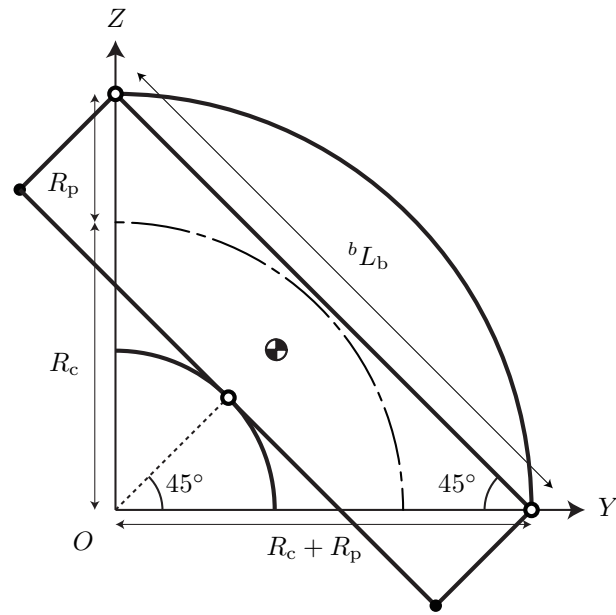


図 3.12: Boundary of the robot's axial length (three modular type)

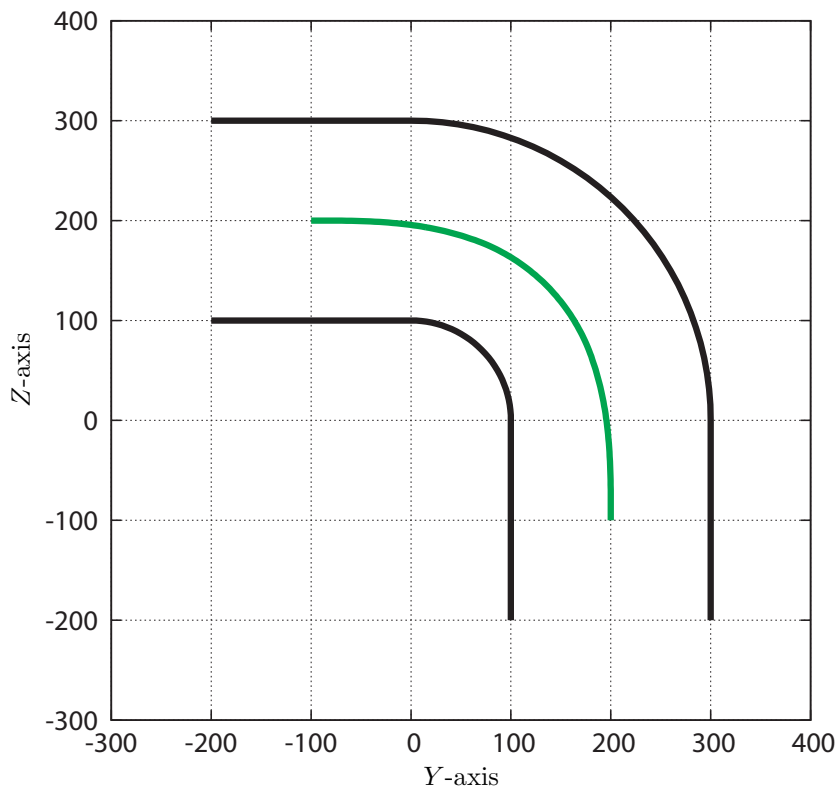


図 3.13: Trajectory of center of the three modular type

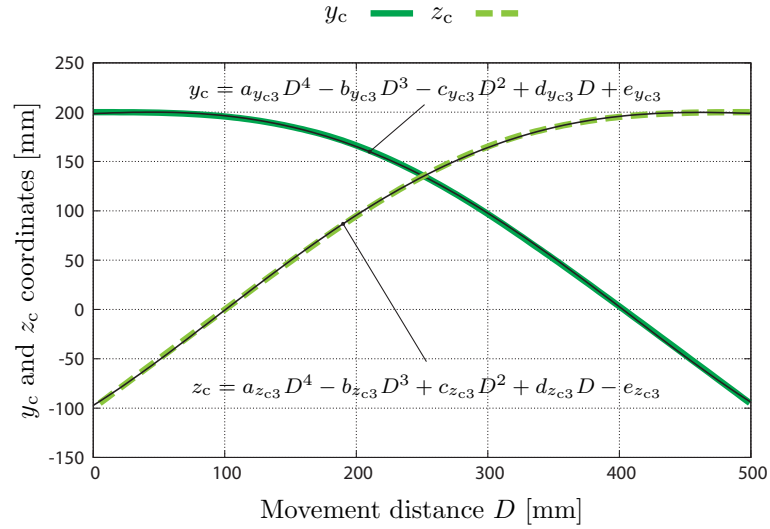


図 3.14: y_c and z_c coordinates of the three modular type

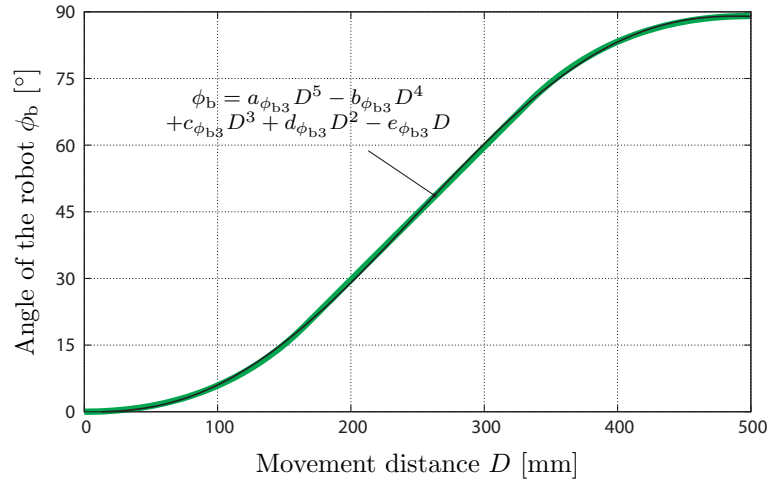


図 3.15: Orientation angle of the three modular type robot ϕ_b with respect to D

ここでも螺旋駆動型の場合と同様に、 ϕ_{fo} を入力値として与えたときの重心座標を式 (3.12) を用いて図 3.13 のように描画することができる。このとき、移動距離 D と Y 座標及び Z 座標の関係は図 3.14 のようになる。これらの近似曲線を最小二乗法を用いて求めると、移動距離 D とロボット重心の Y 座標の関係は

$$y_c = a_{y_{c3}} D^4 - b_{y_{c3}} D^3 - c_{y_{c3}} D^2 + d_{y_{c3}} D + e_{y_{c3}} \quad (3.26)$$

$$z_c = a_{z_{c3}} D^4 - b_{z_{c3}} D^3 + c_{z_{c3}} D^2 + d_{z_{c3}} D - e_{z_{c3}} \quad (3.27)$$

で表すことができる。ただし、それぞれの係数は $a_{y_{c3}} = 6.82 \times 10^{-9}$, $b_{y_{c3}} = 5.30516 \times 10^{-6}$, $c_{y_{c3}} = 3.4093298 \times 10^{-4}$, $d_{y_{c3}} = 5.926419068 \times 10^{-2}$, $e_{y_{c3}} = 198.52470994105$, $a_{z_{c3}} = 7.41 \times 10^{-9}$, $b_{z_{c3}} = 8.97805 \times 10^{-6}$, $c_{z_{c3}} = 2.15608893 \times 10^{-3}$, $d_{z_{c3}} = 8.3233462341 \times 10^{-2}$, $e_{z_{c3}} = 97.22384283655$ となった。

同様に、移動距離 D とロボットの姿勢角 ϕ_b の関係は図 3.15 のようになる。この値も最小二乗法を用いると、

$$\phi_b = a_{\phi_{b3}} D^5 - b_{\phi_{b3}} D^4 + c_{\phi_{b3}} D^3 + d_{\phi_{b3}} D^2 - e_{\phi_{b3}} D \quad (3.28)$$

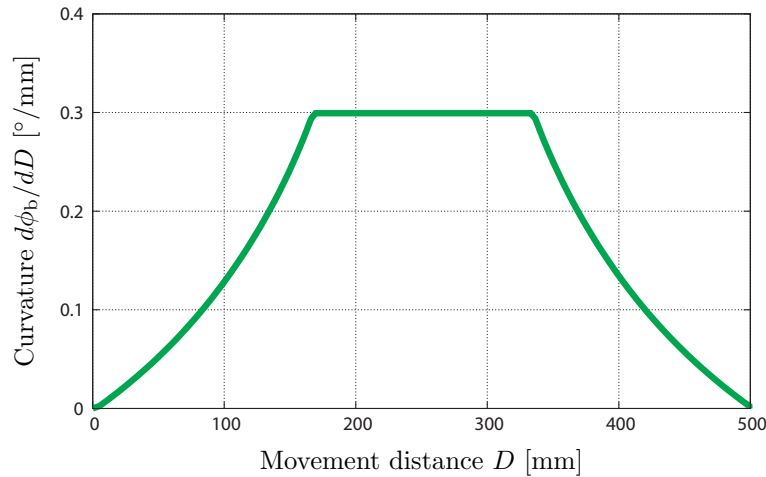


図 3.16: Derivative of ϕ_b with respect to D in case of the three modular type

として近似曲線で表すことができる。ただし、それぞれの係数は $a_{\phi_{b3}} = 1.25 \times 10^{-11}$, $b_{\phi_{b3}} = 1.5658 \times 10^{-8}$, $c_{\phi_{b3}} = 4.8001483 \times 10^{-6}$, $d_{\phi_{b3}} = 3.178643926 \times 10^{-4}$, $e_{\phi_{b3}} = 5.0365534729 \times 10^{-3}$ となった。

ここで、螺旋駆動型の場合と同様に曲率を求めると図 3.16 のようになる。図からわかるように、ロボットが直管内から曲管内へとちょうど移り変わる状態、あるいはその逆の状態(曲管から直管)では徐々に曲率が増減しているのがわかる。しかし、螺旋駆動型のときとは異なり、曲率と移動距離の関係は正確な線形性を持っておらず、高次曲線となっている。この曲線は 2 次関数で近似することができる。この場合、重心軌道の曲率の傾きは一定にならないが、直線部分から曲線部分までを滑らかな軌道で結ぶクロソイド曲線と同様の役割を果たすため、ここで得られた重心軌道も緩和曲線の特徴を有している。また、ロボット外側後部の接触点 $[y_{ro} \ z_{ro}]^T$ が曲管の外側へ移動した後は一定の曲率を保つため、軌道は円弧に一致する。

3.1.2 曲管の断面形状の定式化

前項では、配管検査ロボットが曲管内を走行する際の重心軌道 y_c , z_c 及び姿勢角 ϕ_b を推定した。これらはすべてロボットの移動距離 D の関数で表すことができるため、ロボットが一定速度で移動するときの値として用いることができる。本節ではこれをさらにベクトル解析を用いて 3 次元へと展開し、移動距離 D とロボットの空間的制約の関係について明らかにする。これはロボットの拡張範囲に相当するため、伸縮機構の拡張範囲や駆動部分の位置等の推定にも応用することができる。

曲管の断面は駆動部の接触点によって定まるため図 3.17 のように表すことができる。螺旋駆動型の場合、駆動部の接触点は腕を伸ばした直線と配管との交点で決まり、図 3.17 (a) のように 4 点で表すことができる。これらの内、ロボット前部の 2 つの接触点を通る YZ 平面に垂直な平面で切ったとき、断面 \mathcal{F} が現れる。同様に、ロボット後部の 2 つの接触点を通る YZ 平面に垂直な平面で切ったとき、断面 \mathcal{R} が現れる。

一方、3 モジュール型の場合、駆動部の接触点は長方形と配管の接触点で決まるため、図 3.17 (b) のように 3 点となる。そのため、断面 \mathcal{F} 及び \mathcal{R} に加え、内側の接

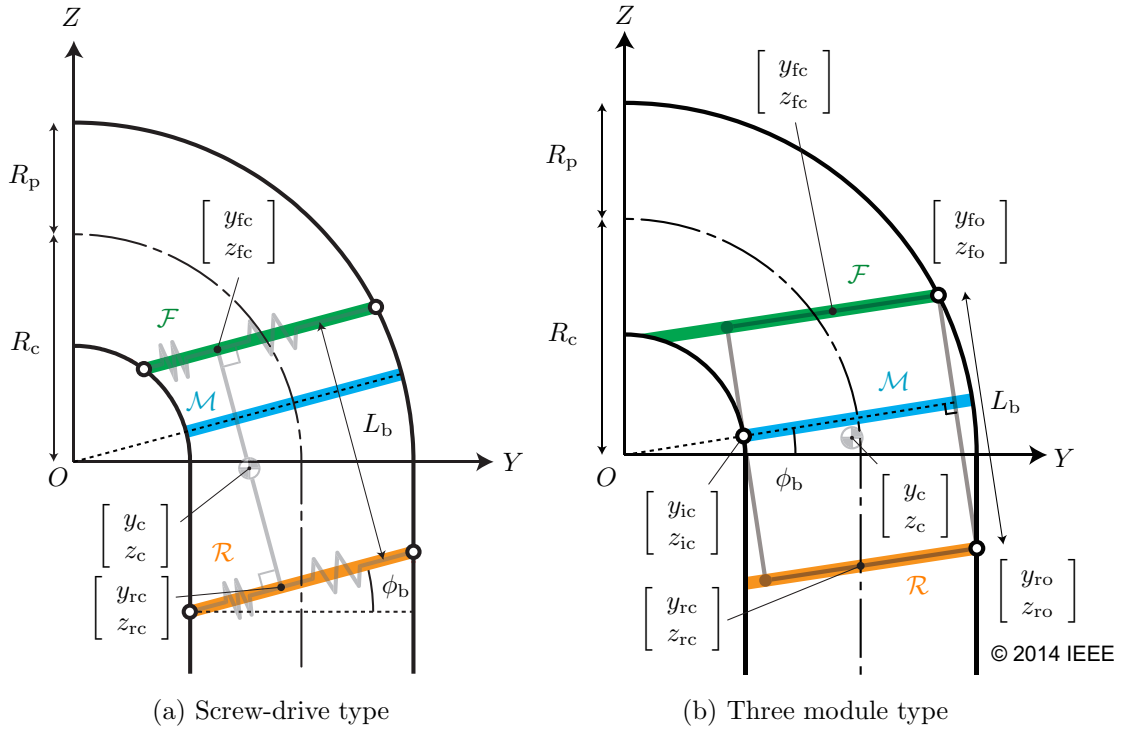


図 3.17: Cross-sections of the robot in a bent pipe

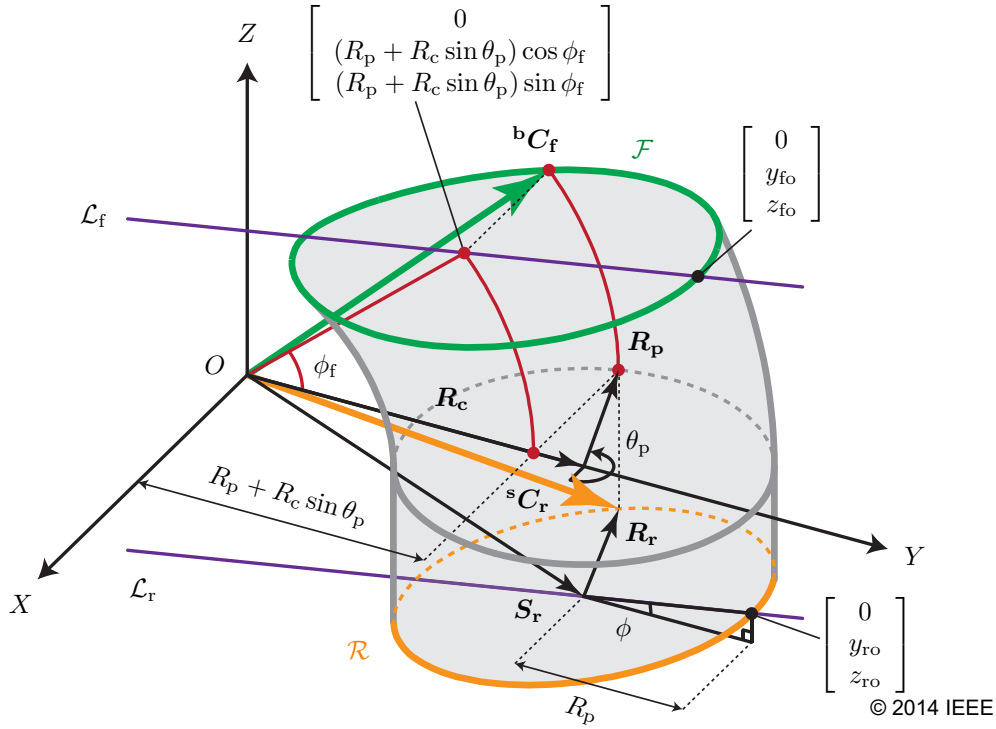
触点を通る断面 \mathcal{M} も考慮しなければならない．3 モジュール型は前部から後部まで駆動部が連なって存在しているため，これら 3 つの断面を平面上に投影したときの最も内側の空間に移動が制限されることになる．ここでは，実際に前項で得られた重心軌道と姿勢角を基に配管の断面を 3 次元的に求めていく．なお，配管の断面を求める手法は既に文献 [18] でも言及されているが，直管から曲管，あるいは曲管から直管へ移り変わる際の断面については触れておらず，また，断面形状の定式化についても詳しく述べられていないことをここに記しておく．

$z_{ro} < 0$ のときの配管の断面

まず初めに， $z_{ro} < 0$ のときの断面を求めていく．断面 \mathcal{F} と \mathcal{R} を 3 次元空間で表したものを図 3.18 に示す．配管の半径を表すベクトル \mathbf{R}_p 及び曲管の曲率半径を表すベクトル \mathbf{R}_c はそれぞれ，

$$\mathbf{R}_p = \begin{bmatrix} R_p \cos \theta_p \\ R_p \sin \theta_p \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.29}$$

$$\mathbf{R}_c = \begin{bmatrix} 0 \\ R_c \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.30}$$


 図 3.18: Cross-sections of straight and bent pipes when $z_{ro} < 0$

で表される．断面 \mathcal{F} はこれら 2 つのベクトルの和を X 軸周りに ϕ_f 回転させたものに相当し，回転変換行列 \mathbf{T}_{ϕ_f} を用いて

$$\begin{aligned} {}^b\mathbf{C}_f &= \mathbf{T}_{\phi_f}(\mathbf{R}_p + \mathbf{R}_c) \\ &= \begin{bmatrix} R_p \cos \theta_p \\ (R_p \sin \theta_p + R_c) \cos \phi_f \\ (R_p \sin \theta_p + R_c) \sin \phi_f \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.31)$$

で表現される． \mathbf{T}_{ϕ_f} の各成分を以下に示す．

$$\mathbf{T}_{\phi_f} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi_f & -\sin \phi_f \\ 0 & \sin \phi_f & \cos \phi_f \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

これにより， θ_p を 0 から 360° まで変化させると断面 \mathcal{F} を 3次元空間上に描くことができる．

ここで角度 ϕ_f は定数ではなく， θ_p の回転とともに変化するため， θ_p の関数で表しておく．断面 \mathcal{F} と YZ 平面の交線 \mathcal{L}_f は図 3.17 に示す $[0 \ y_{fc} \ z_{fc}]^T$ を通り，傾きは ϕ_b となるため，

$$\mathcal{L}_f : z = \tan \phi_b (y - y_{fc}) + z_{fc} \quad (3.33)$$

で表すことができる．この直線 \mathcal{L}_f と断面ベクトル ${}^b\mathbf{C}_f$ の Y 座標及び Z 座標はそれぞれ互いに一致するため，式 (3.31) の Y 座標及び Z 座標を式 (3.33) に代入すると，

$$\phi_f = \phi_b + \sin^{-1} \frac{z_{fc} \cos \phi_b - y_{fc} \sin \phi_b}{R_c + R_p \sin \theta_p} \quad (3.34)$$

が得られる。また、ここで y_{fc} 及び z_{fc} は幾何学的関係から、

$$\begin{bmatrix} y_{fc} \\ z_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_c - \frac{L_b}{2} \sin \phi_b \\ z_c + \frac{L_b}{2} \cos \phi_b \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

により求めることができる。

一方、ロボット後部の断面 \mathcal{R} は直管を傾き ϕ_b で斜めに切ったときの断面に等しく、以下のベクトルで表すことができる。

$${}^s\mathbf{C}_r = \mathbf{S}_r + \mathbf{R}_r. \quad (3.36)$$

直管の断面を表すベクトル \mathbf{R}_r は

$$\mathbf{R}_r = \begin{bmatrix} R_p \cos \theta_p \\ R_p \sin \theta_p \\ R_p \sin \theta_p \tan \phi_b \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

で表される。ここで断面 \mathcal{R} と YZ 平面の交線 \mathcal{L}_r は \mathcal{L}_f と同様に $[0 \ y_{rc} \ z_{rc}]^T$ を通り、傾きは ϕ_b となるため、

$$\mathcal{L}_r : z = \tan \phi_b (y - y_{rc}) + z_{rc} \quad (3.38)$$

で表すことができる。平行移動の機能を持つベクトル \mathbf{S}_r の Y 成分は常に Z 軸に平行な直管の中心 ($Y = R_c$) に一致し、さらに終点は断面 \mathcal{R} と YZ 平面の交線 \mathcal{L}_r 上を移動するため、式 (3.38) に $Y = R_c$ を代入することでベクトル \mathbf{S}_r の Z 成分も求めることができる。これらをまとめると \mathbf{S}_r は以下のように表される。

$$\mathbf{S}_r = \begin{bmatrix} 0 \\ R_c \\ \tan \phi_b (R_c - y_{rc}) + z_{rc} \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

y_{rc} 及び z_{rc} は幾何学的関係から、

$$\begin{bmatrix} y_{rc} \\ z_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_c + \frac{L_b}{2} \sin \phi_b \\ z_c - \frac{L_b}{2} \cos \phi_b \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

により求めることができる。

なお、断面 \mathcal{M} は X 軸周りに ϕ_b 回転させたときの回転変換行列 \mathbf{T}_{ϕ_b} を用いて

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_m &= \mathbf{T}_{\phi_b} (\mathbf{R}_p + \mathbf{R}_c) \\ &= \begin{bmatrix} R_p \cos \theta_p \\ (R_p \sin \theta_p + R_c) \cos \phi_b \\ (R_p \sin \theta_p + R_c) \sin \phi_b \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.41)$$

で表すことができる。これは曲率半径の中心 (座標系の原点) を通る傾き ϕ_b の平面で曲管を切ることを意味し、断面は必ず正円になる。回転変換行列 \mathbf{T}_{ϕ_b} は式 (3.32) と同様に

$$\mathbf{T}_{\phi_b} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi_b & -\sin \phi_b \\ 0 & \sin \phi_b & \cos \phi_b \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

で表すことができる。

に一致するため、式(3.49)の Y 座標及び Z 座標を式(3.38)に代入すると、

$$\phi_r = \phi_b + \sin^{-1} \frac{z_{rc} \cos \phi_b - y_{rc} \sin \phi_b}{R_c + R_p \sin \theta_p} \quad (3.45)$$

が得られる。

$z_{ro} \geq 0$ のときの直管部分の断面

ベクトル ${}^b\mathbf{C}_f$ が X 軸の負の領域に移動したときの断面とベクトル ${}^b\mathbf{C}_r$ が Z 軸の負の領域に移動したときの断面を図3.20に示す。

\mathcal{F} の直管部分の断面は Y 軸に平行な直管を傾き ϕ_b で斜めに切ったときの断面に等しく、式(3.36)と同様に以下のベクトルで表すことができる。

$${}^s\mathbf{C}_f = \mathbf{S}_f + \mathbf{R}_f \quad (3.46)$$

ベクトル \mathbf{S}_f の Z 成分は常に Y 軸に平行な直管の中心($Z = R_c$)に一致し、さらに終点は断面 \mathcal{F} と YZ 平面の交線 \mathcal{L}_f 上を移動するため、式(3.33)に $Z = R_c$ を代入することでベクトル \mathbf{S}_f の Y 成分も求めることができる。これらをまとめると \mathbf{S}_f は以下のように表される。

$$\mathbf{S}_f = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{R_c - z_{fc}}{\tan \phi_b} + y_{fc} \\ R_c \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

\mathbf{R}_f は Y 軸に平行な直管の断面ベクトルであるため、 \mathbf{R}_r を X 軸周りに 90° 回転変換することによって求めることができる。

しかし、このとき初めに定義した ϕ_b も同様に 90° 回転するため、角度の次元を合わせるために ϕ_b の値を $\phi_b - 90^\circ$ として用いる。これらをまとめるとベクトル \mathbf{R}_f は以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_f &= \mathbf{T}_{90^\circ} \mathbf{R}_r \\ &= \begin{bmatrix} R_p \cos \theta_p \\ -R_p \sin \theta_p \tan(\phi_b - 90^\circ) \\ R_p \sin \theta_p \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.48)$$

\mathbf{T}_{90° は X 軸周りに 90° 回転させるための回転変換行列を表している。同様の方法でベクトル ${}^s\mathbf{C}_r$ は

$${}^s\mathbf{C}_r = \mathbf{S}_r + \mathbf{R}_r \quad (3.49)$$

で与えられる。ベクトル \mathbf{S}_r 及び \mathbf{R}_r は式(3.39)及び(3.37)によって既に定義しているため、ここでも同じ式を用いることができる。

以上のベクトルはすべて y_c , z_c , ϕ_b の関数として与えられ、これら3つのパラメータを前項で移動距離 D に関する近似曲線として既に表している。よって、これらを用いることにより、ロボットが直管内を通り曲管内を経由して次の直管内へと移り変わるすべての過程において配管の断面を求めることができる。図3.21に螺旋駆動型($L_b = 80$)の場合の配管の断面を、図3.22に螺旋駆動型($L_b = 140$)の場合

の配管の断面を、図3.23に3モジュール型の場合の配管の断面をそれぞれ示す。なお、ロボット後部の断面 \mathcal{R} が完全に $Y \leq 0$ の領域に入った瞬間の D を D_{\max} とし、 $0 \leq D \leq D_{\max}$ を8分割して描画を行った。

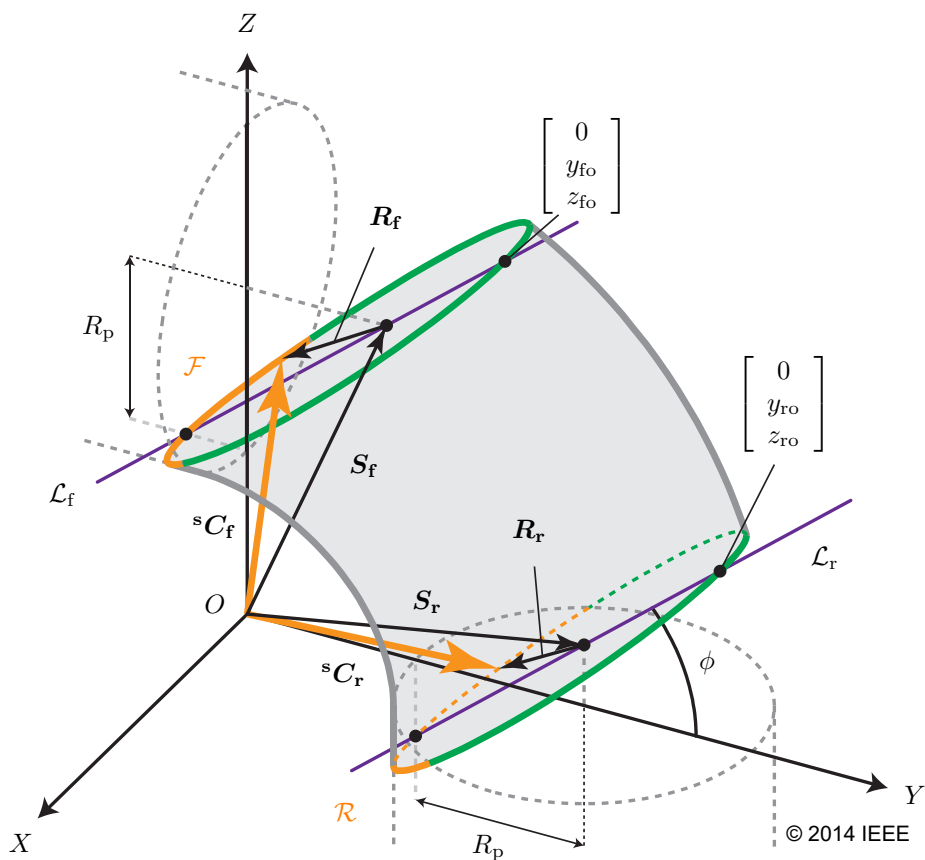


図 3.20: Cross-sections of a straight pipe when $z_{ro} \geq 0$

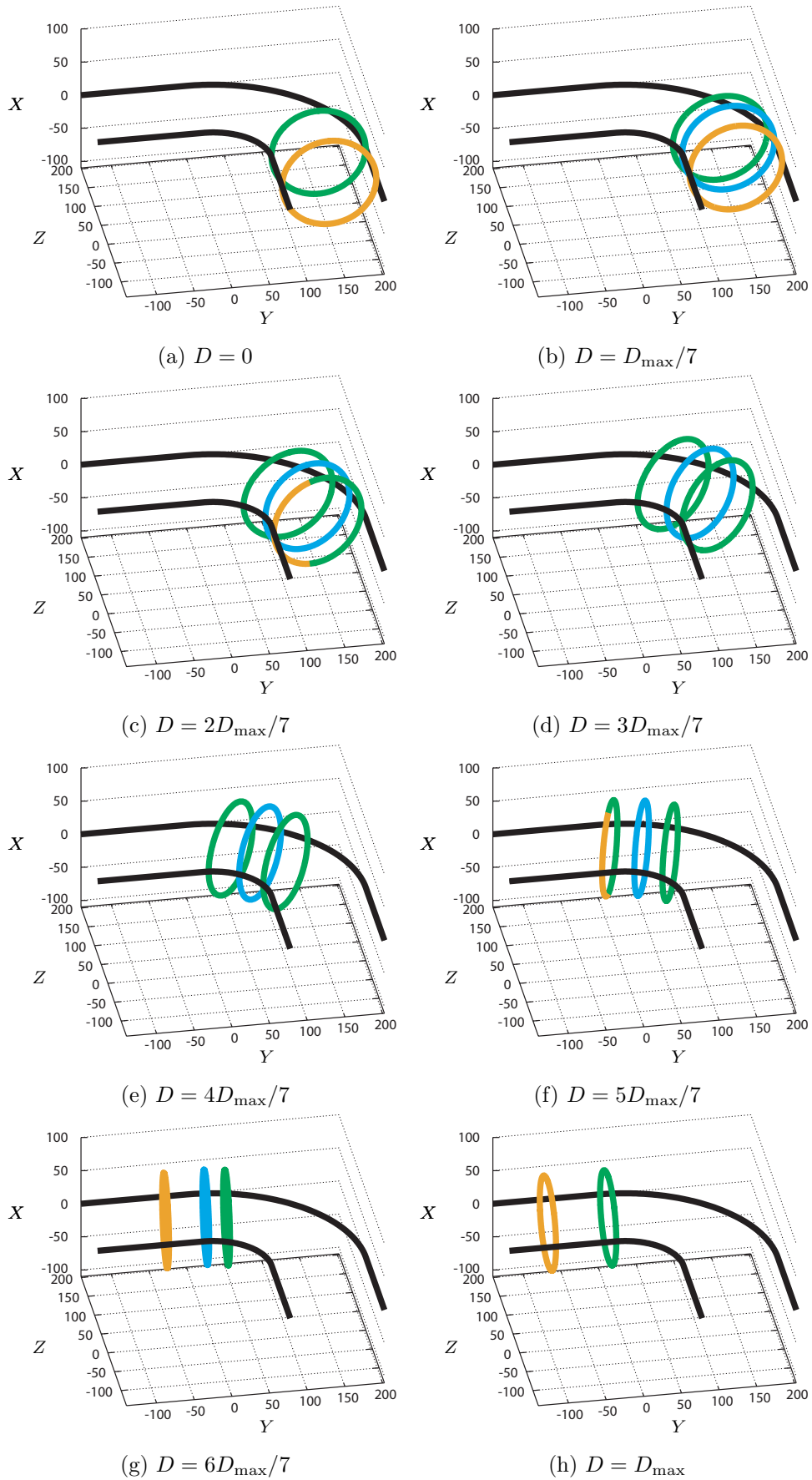


図 3.21: Front, middle, and rear cross-sections in the case of the screw-driving type ($L_b = 80$).

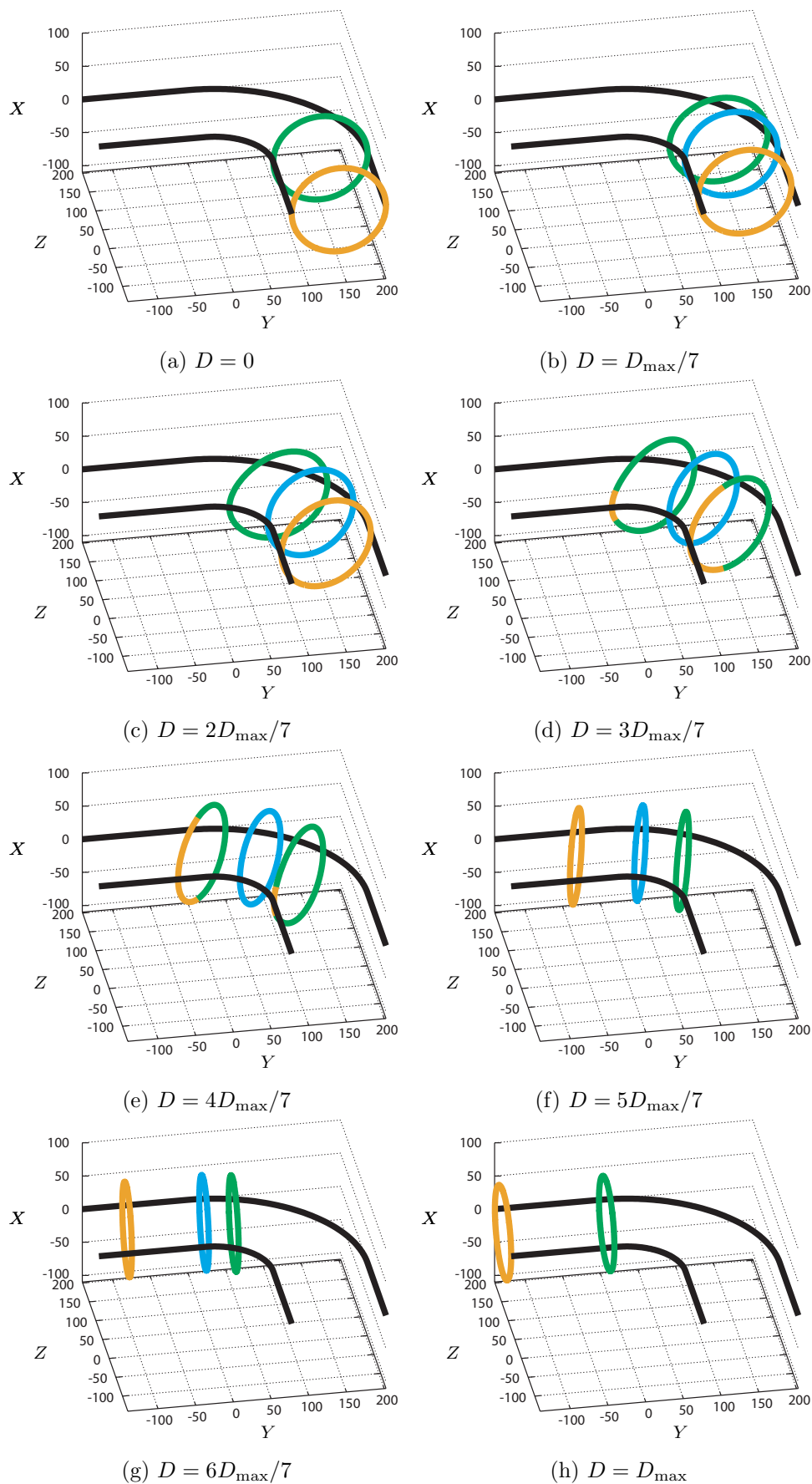


図 3.22: Front, middle, and rear cross-sections in the case of the screw-driving type ($L_b = 140$).

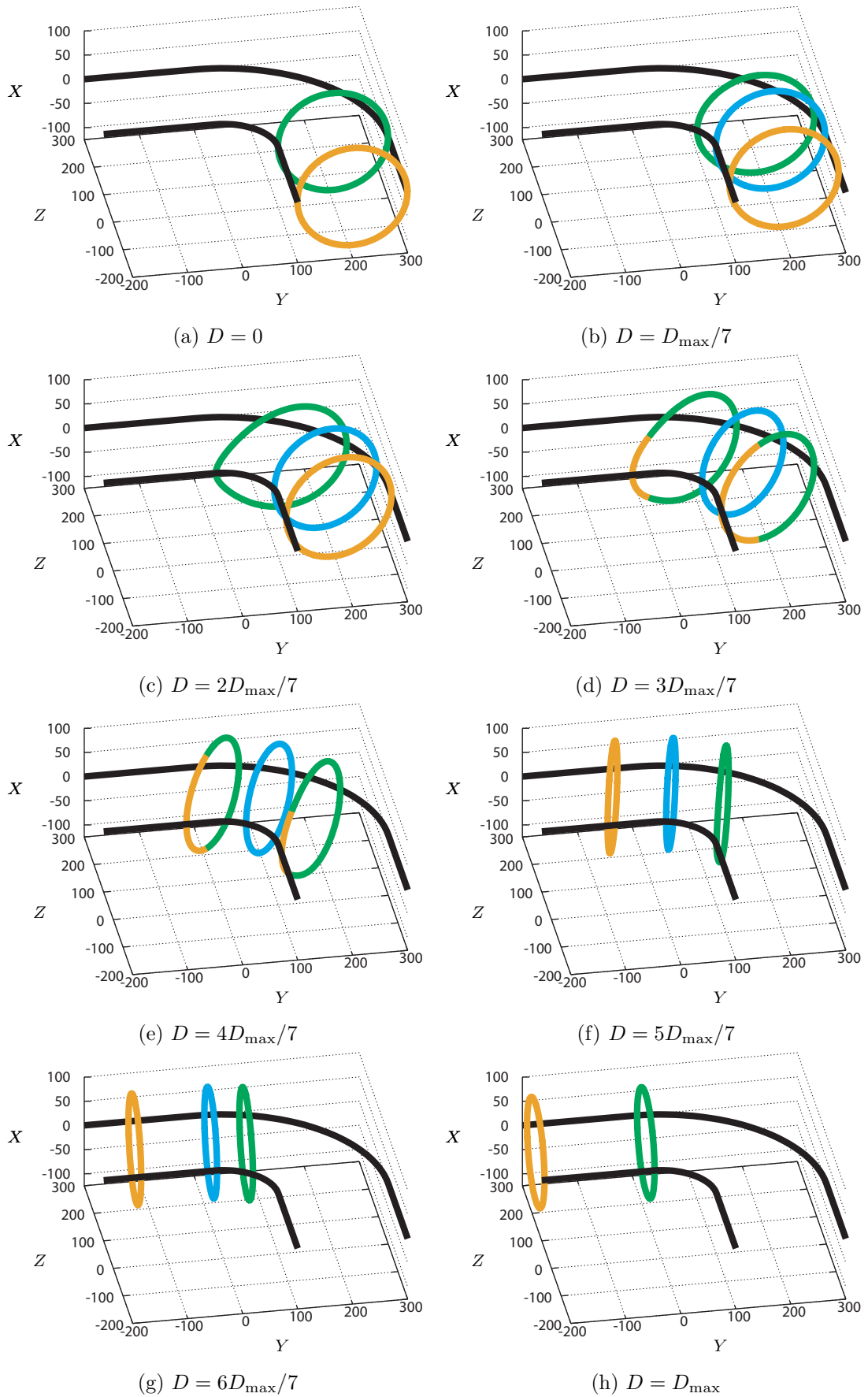


図 3.23: Front, middle, and rear cross-sections in the case of the three modular type.

3.1.3 伸縮機構の拡張範囲

前項では、ロボットが曲管内を走行する際の配管の断面形状から配管内壁面によって制限される空間を求めた。本項では、求めた断面形状を基に伸縮機構の空間的制約(拡張範囲)について明らかにする。

まず、断面ベクトル ${}^b\mathbf{C}_f$, ${}^s\mathbf{C}_f$, \mathbf{C}_m , ${}^b\mathbf{C}_r$, ${}^s\mathbf{C}_r$ をそれぞれ2次元平面に投影するためには、これら3つのベクトルを X 軸周りに $-\phi_b$ 回転させたときの X 成分及び Y 成分を取り出せば良い。そのため、回転変換行列 $\mathbf{T}_{-\phi_b}$ を

$$\mathbf{T}_{-\phi_b} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi_b & \sin \phi_b \\ 0 & -\sin \phi_b & \cos \phi_b \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

で与えられると、以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} {}^b_2\mathbf{C}_f &= \mathbf{T}_{-\phi_b} {}^b\mathbf{C}_f \\ &= \begin{bmatrix} R_p \cos \theta_p \\ \sqrt{(R_c + R_p \sin \theta_p)^2 - A_f^2} \\ A_f \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.51)$$

$$\begin{aligned} {}^s_2\mathbf{C}_f &= \mathbf{T}_{-\phi_b} {}^s\mathbf{C}_f \\ &= \begin{bmatrix} R_p \cos \theta_p \\ \frac{R_c + R_p \sin \theta_p - A_f \cos \phi_b}{\sin \phi_b} \\ A_f \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.52)$$

$$\begin{aligned} {}_2\mathbf{C}_m &= \mathbf{T}_{-\phi_b} \mathbf{C}_m \\ &= \begin{bmatrix} R_p \cos \theta_p \\ R_c + R_p \sin \theta_p \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.53)$$

$$\begin{aligned} {}^b_2\mathbf{C}_r &= \mathbf{T}_{-\phi_b} {}^b\mathbf{C}_r \\ &= \begin{bmatrix} R_p \cos \theta_p \\ \sqrt{(R_c + R_p \sin \theta_p)^2 - A_r^2} \\ A_r \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.54)$$

$$\begin{aligned} {}^s_2\mathbf{C}_r &= \mathbf{T}_{-\phi_b} {}^s\mathbf{C}_r \\ &= \begin{bmatrix} R_p \cos \theta_p \\ \frac{R_c + R_p \sin \theta_p + A_r \sin \phi_b}{\cos \phi_b} \\ A_r \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3.55)$$

ただし、 A_f 及び A_r は、

$$A_f = z_{fc} \cos \phi_b - y_{fc} \sin \phi_b \quad (3.56)$$

$$A_r = z_{rc} \cos \phi_b - y_{rc} \sin \phi_b \quad (3.57)$$

とする。

これらのベクトル b_2C_f , s_2C_f , ${}_2C_m$, b_2C_r , s_2C_r の X 成分と Y 成分を用いて θ_p を打ち消すと、すべての断面を以下のように X と Y の 2 次元曲線関数として表すことができる。

$${}^b_2C_f : x^2 + (\sqrt{y^2 + A_f^2} - R_c)^2 = R_p^2 \quad (3.58)$$

$${}^s_2C_f : x^2 + (y \sin \phi_b + A_f \cos \phi_b - R_c)^2 = R_p^2 \quad (3.59)$$

$${}_2C_m : x^2 + (y - R_c)^2 = R_p^2 \quad (3.60)$$

$${}^b_2C_r : x^2 + (\sqrt{y^2 + A_r^2} - R_c)^2 = R_p^2 \quad (3.61)$$

$${}^s_2C_r : x^2 + (y \cos \phi_b - A_r \sin \phi_b - R_c)^2 = R_p^2 \quad (3.62)$$

s_2C_f 及び s_2C_r は楕円を、 ${}_2C_m$ は正円を表しているが、 b_2C_f 及び b_2C_r は卵型の曲線を表している。

次に、導出した 2 次元断面曲線を基に、螺旋駆動型と 3 モジュール型の伸縮機構の釣り合いを考えていく。

螺旋駆動型の場合

螺旋駆動型の場合、駆動部は前部ユニット (ローター) のみに限られるため、ロボット前部の断面を考慮すれば良い。伸縮機構は図 3.24 のように 2 次元断面 b_2C_r と s_2C_r によって囲まれる範囲内で拡張する。螺旋駆動型配管検査ロボットの前部ユニットの配管内壁面との接触点は、前部ユニットの腕の先端座標で定義することができ、以下のように表される。

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_c + \ell_a \cos \theta_a \\ y_c + \ell_a \sin \theta_a \end{bmatrix} \quad (3.63)$$

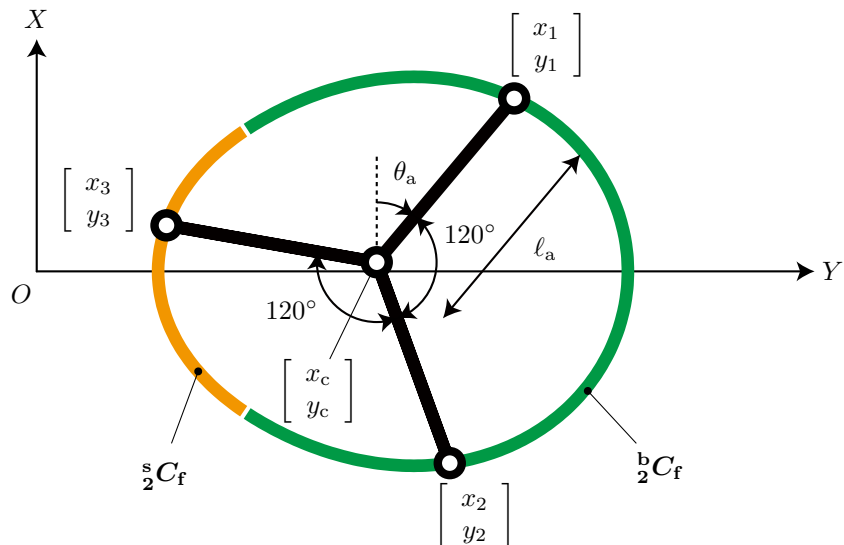


図 3.24: Balanced position of the robot in the expandable space (screw-driving type)

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_c + l_a \cos(\theta_a + 120^\circ) \\ y_c + l_a \sin(\theta_a + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (3.64)$$

$$\begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_c + l_a \cos(\theta_a + 240^\circ) \\ y_c + l_a \sin(\theta_a + 240^\circ) \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

式 (3.63), (3.64), (3.65) を式 (3.58) 及び (3.59) に代入すると x_c, y_c, l_a を変数とする 3 元連立方程式が得られる。これらは 3.1.1 項と同様にニュートン・ラプソン法による求根アルゴリズムを用いて近似解を求めることができる。ただし、断面はロボットの移動距離によって曲管部 (卵型曲線) のみの場合、曲管部 (卵型曲線) と直管部 (楕円) の両方を含む場合、直管部 (楕円) のみの場合に分かれるため、今回は断面 \mathcal{F} 上を移動する 3 つの接触点が 3 次元空間上において Y 軸正の場合、式 (3.58) を、 Y 軸負の場合、式 (3.59) を使用することとする。これにより、前部ユニットの回転角度 θ_a を入力として与えた時の各接触点の座標と前部ユニットの中心座標を求めることができる。

また、第 2 章で定義した螺旋駆動型配管検査ロボットの回転角度 θ_a と移動距離 D の関係を式 (3.14), (3.15), (3.16) に代入すると、 θ_a を入力として与えた時の断面形状を求めることができる。これらに基づき腕の各接触点の座標と前部ユニットの中心座標を求めると、ロボットが直管内から曲管内を経由して次の直管内へと移動するすべての過程において接触点の軌道を求めることができる。

しかし、ここで得られた結果は前部ユニットの厚さが 0 のときのものであり、車輪の厚みを考慮していない。そのため、図 3.25 のように車輪の厚みを考慮したモデルを再定義し、2 つの直線 \mathcal{L}_{f1} 及び \mathcal{L}_{f2} を用いて車輪の接触点を考える。車輪は曲管外側においては直線 \mathcal{L}_{f1} 上で接触し、曲管内側においては直線 \mathcal{L}_{f2} 上で接触するもの

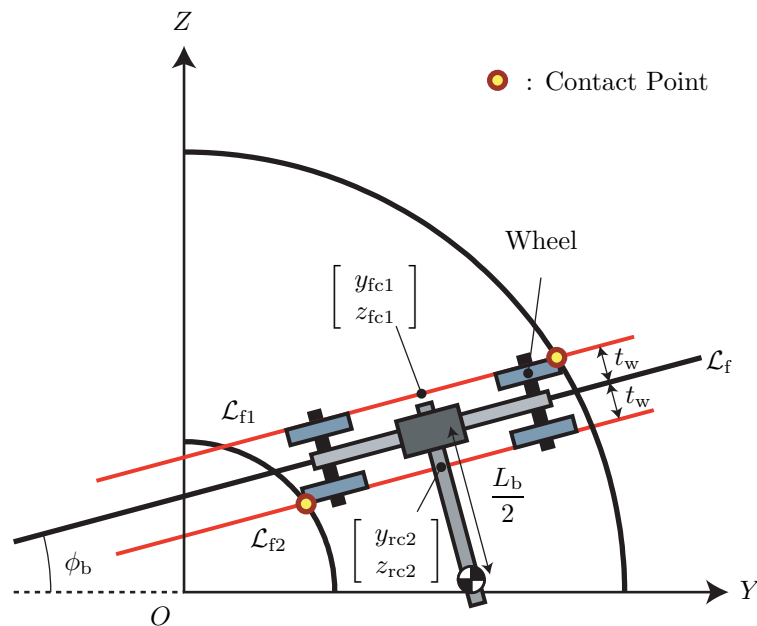


図 3.25: Thickness of the wheels

とする. このとき先端座標 y_{fc1} , z_{fc1} , y_{fc2} , z_{fc2} は幾何学的関係から,

$$\begin{bmatrix} y_{fc1} \\ z_{fc1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_c - \left(\frac{L_b}{2} + t_w \right) \sin \phi_b \\ z_c + \left(\frac{L_b}{2} + t_w \right) \cos \phi_b \end{bmatrix} \quad (3.66)$$

$$\begin{bmatrix} y_{fc2} \\ z_{fc2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_c - \left(\frac{L_b}{2} - t_w \right) \sin \phi_b \\ z_c + \left(\frac{L_b}{2} - t_w \right) \cos \phi_b \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

で求められる. そのため, 式 (3.56) で定義した値は直線 $\mathcal{L}_{f1}(A_{f1})$ と直線 $\mathcal{L}_{f2}(A_{f2})$ の場合でそれぞれ以下のように与えられる.

$$A_{f1} = z_{fc1} \cos \phi_b - y_{fc1} \sin \phi_b \quad (3.68)$$

$$A_{f2} = z_{fc2} \cos \phi_b - y_{fc2} \sin \phi_b. \quad (3.69)$$

これらを式 (3.58), 式 (3.59) の A_f と入れ替えると,

$${}^b_2C_{f1} : x^2 + (\sqrt{y^2 + A_{f1}^2} - R_c)^2 = R_p^2 \quad (3.70)$$

$${}^s_2C_{f1} : x^2 + (y \sin \phi_b + A_{f1} \cos \phi_b - R_c)^2 = R_p^2 \quad (3.71)$$

$${}^b_2C_{f2} : x^2 + (\sqrt{y^2 + A_{f2}^2} - R_c)^2 = R_p^2 \quad (3.72)$$

$${}^s_2C_{f2} : x^2 + (y \sin \phi_b + A_{f2} \cos \phi_b - R_c)^2 = R_p^2 \quad (3.73)$$

が得られる.

以上をまとめると, 螺旋駆動型配管検査ロボットの前部ユニットは図 3.26 に示すように式 (3.70), (3.71), (3.72), (3.73) で囲まれる最も内側の空間で釣り合いを保つことになる.

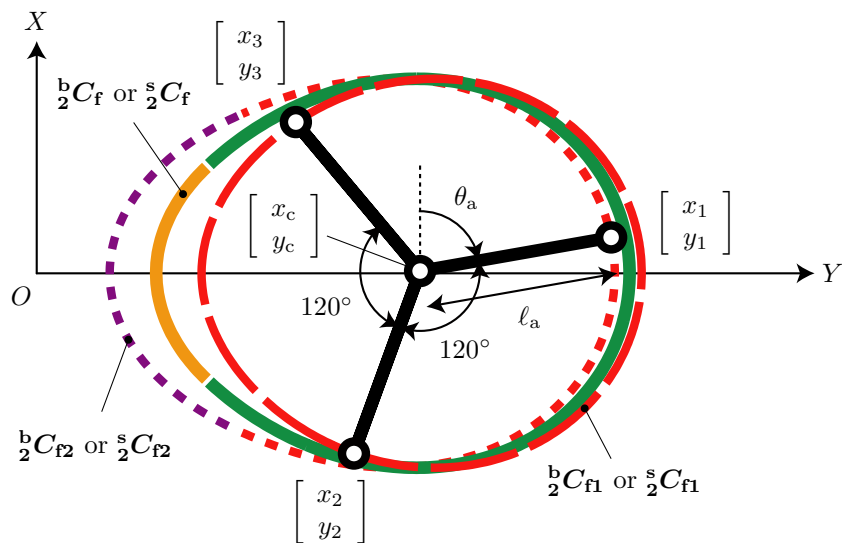


図 3.26: Balanced position of the robot with considering the wheel's thickness (screw-driving type)

これらの拘束条件を維持しながら回転角度 θ_a を入力として与えたときの 3 つの車輪の軌跡を図 3.27 ($L_b = 80$ のとき) に示す. なお, 移動は直管内から開始するため, 今回は $\theta_a = 0$ のとき $l_a = R_p$ として計算を開始した.

図 3.28 は横軸を回転角度 θ_a としたときの伸縮機構の腕の長さの変化を表している. 図より, 螺旋駆動型配管検査ロボットの腕は回転とともに伸び縮みを繰り返していることがわかる.

また, XY 平面上に描画した結果を図 3.29 に示す.

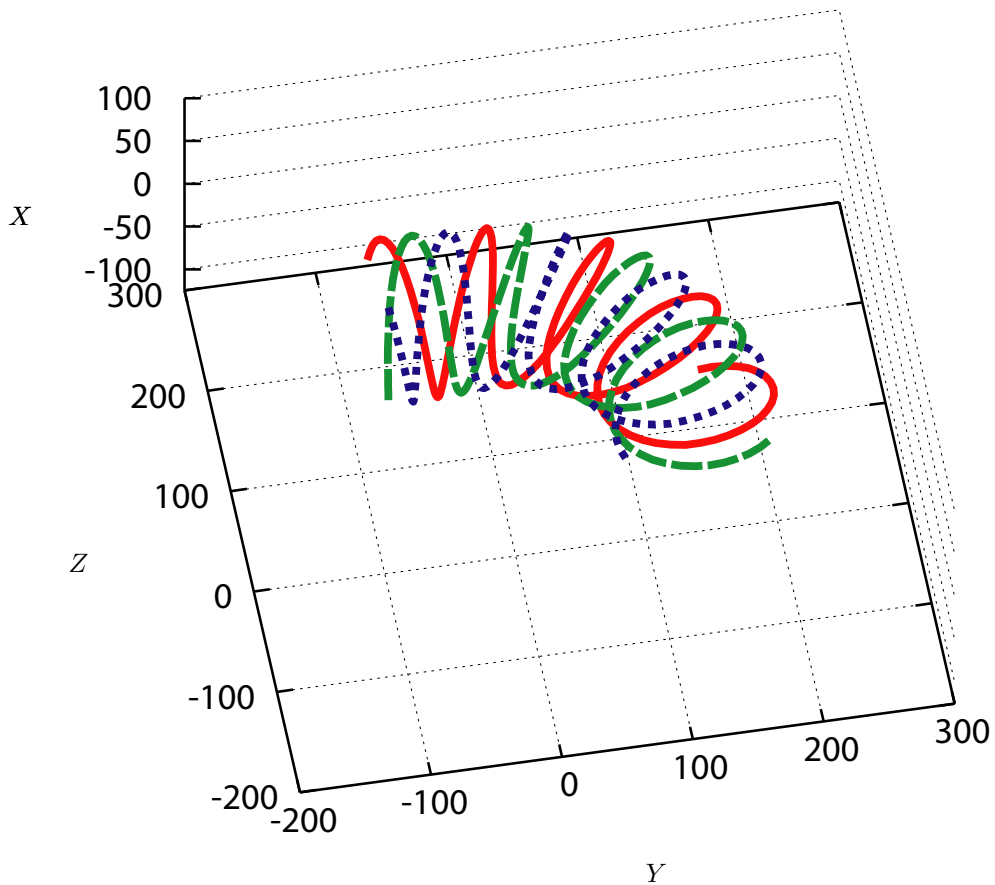


図 3.27: Three trajectories of the wheels in the bent pipe ($L_b = 80$)

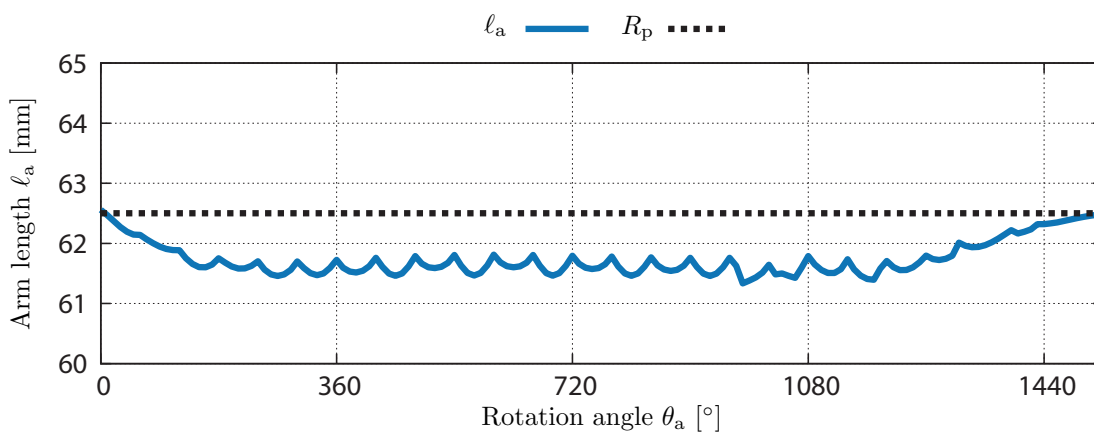


図 3.28: Arm length of the screw-driving type ($L_b = 80$)

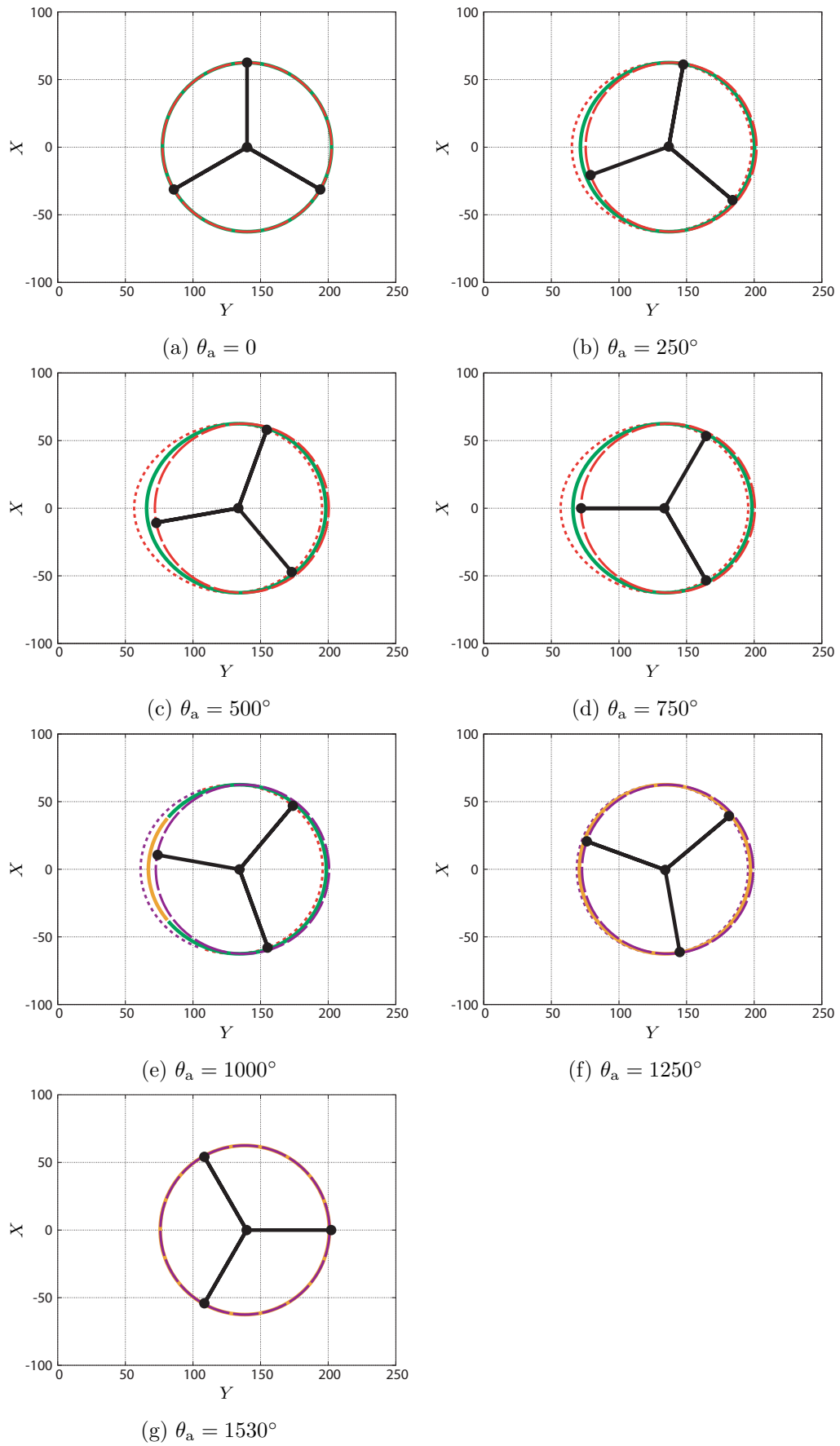


図 3.29: Rotator's position in the case of the screw-driving type ($L_b = 80$)

同様に $L_b = 140$ のときの 3 つの車輪の軌跡を図 3.30 に示す。

図 3.31 は横軸を回転角度 θ_a としたときの伸縮機構の腕の長さの変化を表している。図より、螺旋駆動型配管検査ロボットの腕は回転とともに伸び縮みを繰り返しながら配管の半径に対しても増減していることがわかる。

また、 XY 平面上に描画した結果を図 3.32 に示す。

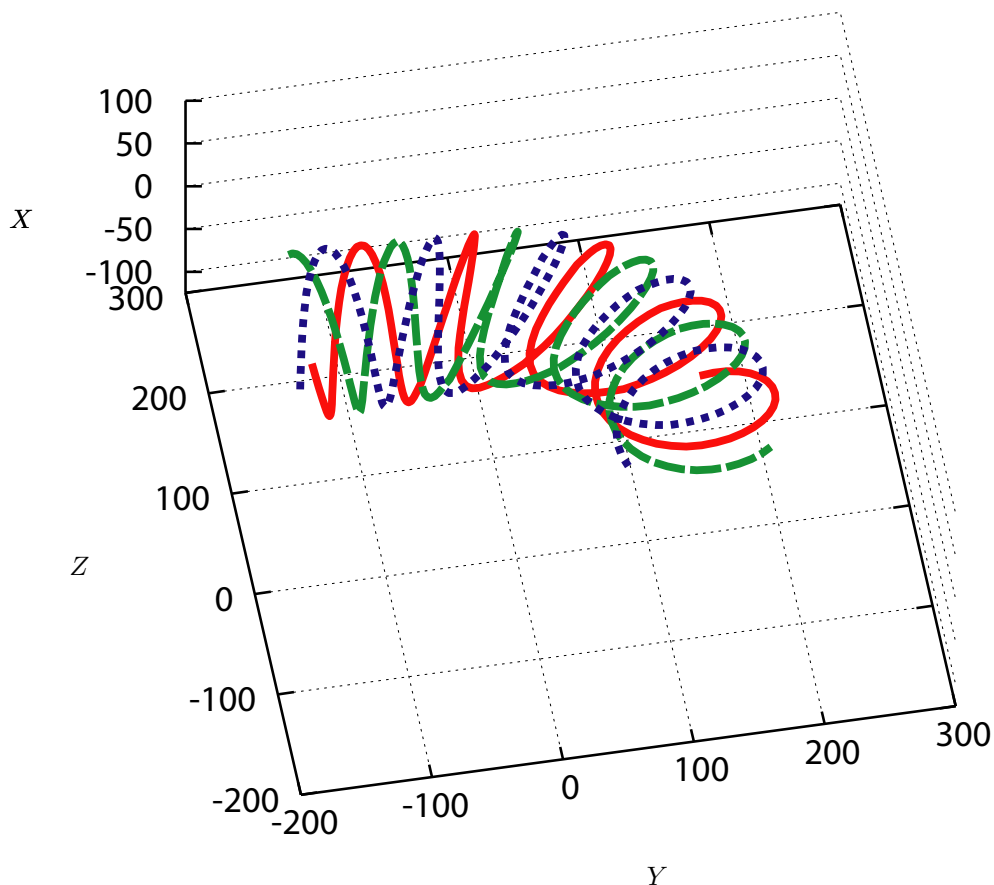


図 3.30: Three trajectories of the wheels in the bent pipe ($L_b = 140$)

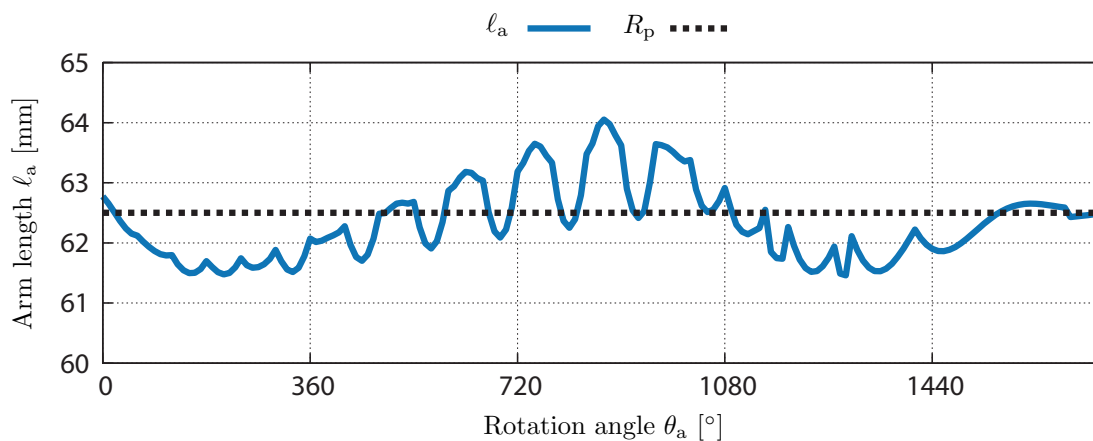


図 3.31: Arm length of the screw-driving type ($L_b = 140$)

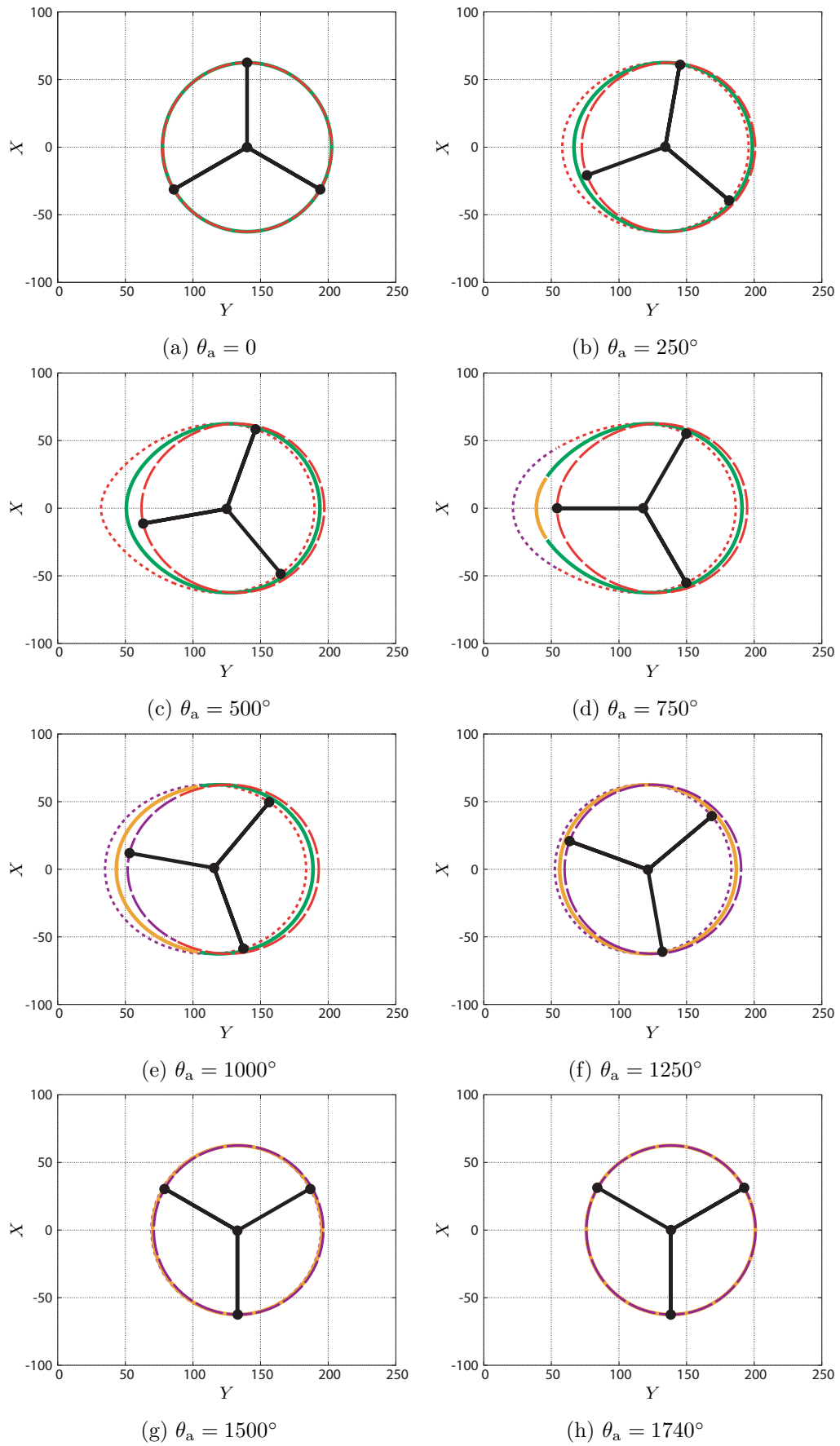


図 3.32: Rotator's position in the case of the screw-driving type ($L_b = 140$)

3 モジュール型の場合

一方、3モジュール型の場合、ロボット全体が駆動しているため、前部、中部、後部までのすべての接触状態を考えなければならない。これら3つの断面を同じ2次元平面上に描画すると、最も空間的に制約される範囲は図3.33のようになる。螺旋駆動型と異なる点として、3モジュール型の場合では、曲管外側部分における曲管の断面と直管の断面が常に重なった状態で変化する。

ここでも螺旋駆動型のとくと同様に式(3.63), (3.64), (3.65)を式(3.58)及び(3.59)に代入すると x_c, y_c, l_a を変数とする3元連立方程式が得られる。この連立方程式はニュートン・ラプソン法を用いて解くことができる。これらの拘束条件を維持しながら移動距離 D を入力として与えた時の結果をを図3.34に示す。なお、移動は直管内から開始するため、今回は $D = 0$ のとき $l_a = R_p$ として計算を開始し、 $\theta_a = 0$ と設定した。また、 XY 平面上に描画した結果を図3.35に示す。

図3.36は横軸を移動距離 D としたときの伸縮機構の腕の長さの変化を表している。図より、3モジュール型配管検査ロボットの腕は曲管内に入り縮んだ後、あるところで一定に推移し、再び元の長さに戻っていくことがわかる。

以上の結果から、ロボットの目標速度及び目標角速度に基づき、第2章で述べた逆運動学の計算式を用いて3つのモジュールの速度を求めることができる。今回は、ロボットの移動距離 D を一定間隔で与えたとき、図3.15で示した ϕ_b の変化量 $\Delta\phi_b$ を角速度 ω_x として逆運動学を解いた。逆ヤコビ行列の l_a の値は図3.36の値を用いた。なお、角速度 $\omega_y = 0$ とし、 $\theta_a = 0$ とした。

図3.37は逆運動学から求めた3つのモジュールのプーリーの回転角度変化量を表しており、これは各プーリーの速度に相当する。最も外側に位置するモジュール2の回転角度変化量 $\Delta\theta_{w2}$ は最も大きく、最も内側に位置するモジュール3の回転角度

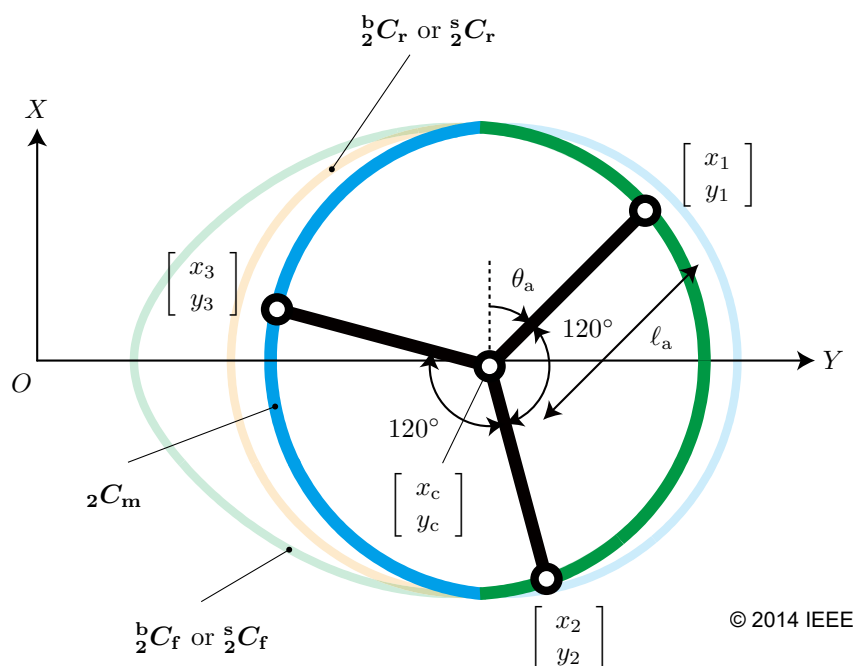


図 3.33: Balanced position of the robot in the expandable space (three modular type)

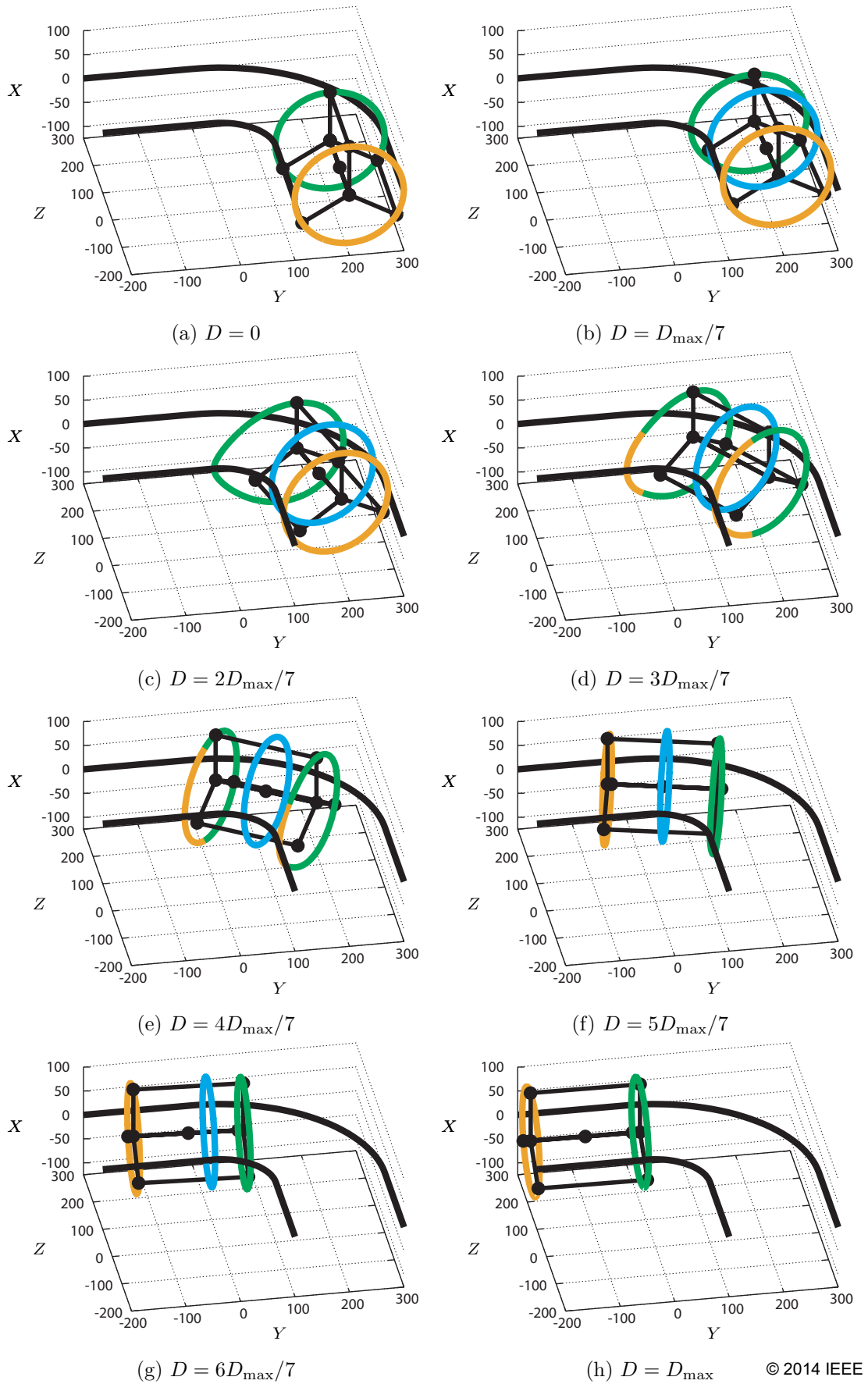


図 3.34: Position of the three modular type robot in 3D.

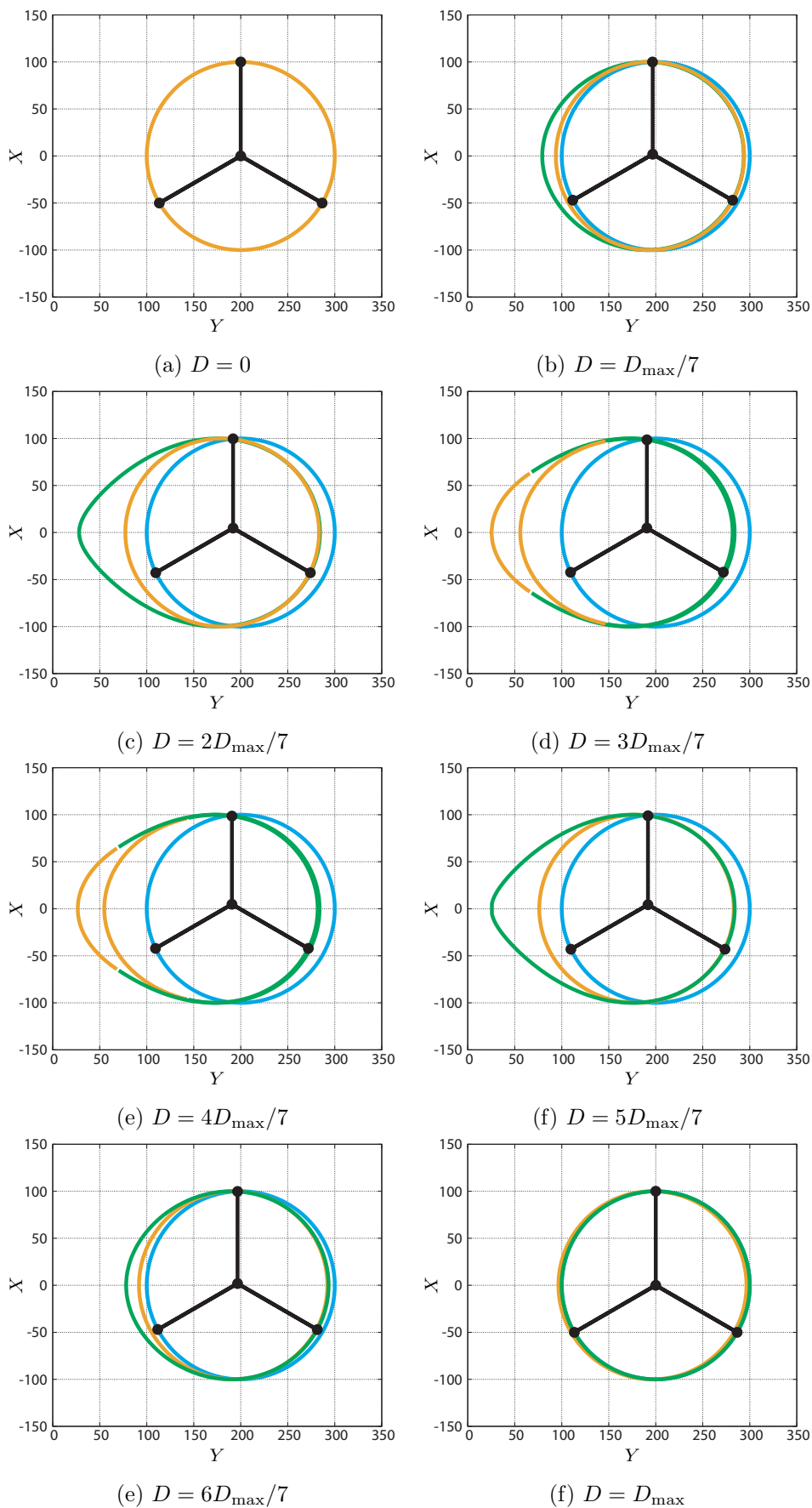


図 3.35: Position of the three modular type robot in 2D.

変化量 $\Delta\theta_{w3}$ は最も小さくなっている。これらの値に基づいて各モジュールの速度を制御することにより、曲管内走行を実現することができる。図3.37では横軸をロボットの移動距離 D としているが、全体の移動距離に対する時間を設定することにより、速度を求めることができる。

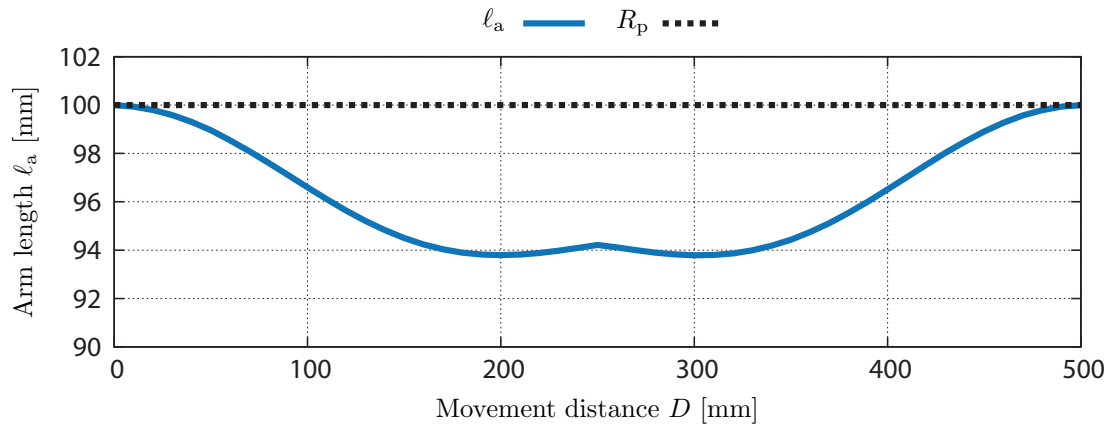


図 3.36: Arm length of the three modular type

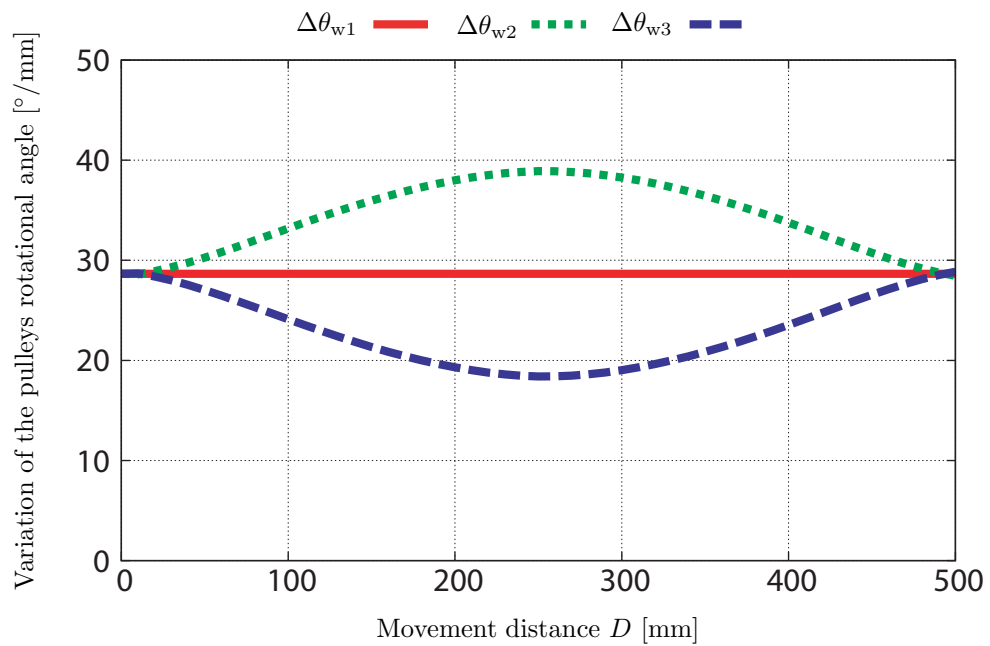


図 3.37: Variation of the pulleys rotational angle where $\theta_a = 0$

3.2 T字管走行の基礎理論

T字管は曲管と異なり経路が連続しておらず，伸縮機構が拡張することによって分岐した空間にロボットが移動する傾向がある．そのため，ロボットと配管内壁面の接触点を一意に推定することは難しい．また，連結能動関節型の1つである螺旋駆動型と干渉駆動型の1つである3モジュール型とでは旋回の方法が全く異なるため，それぞれの特徴に基づいた走行理論を考える必要がある．そこで，本節ではT字管内走行に必要な要素をそれぞれのロボットに分けて論ずる．

3.2.1 螺旋駆動型の場合

螺旋駆動型配管検査ロボットをT字管走行させるためには必ず屈曲動作が必要となる．この動作を妨げないためにも，ロボットのローテーター(前部ユニット)はできるだけ配管内に接触していないことが望ましい．これはローテーターの大きさとT字管内の空間の大きさが走破性に影響を与えることを意味している．この影響を調べるため，ここではT字管の断面形状から空間的な制約を求め，ローテーターの大きさと比較しながらロボットの走破性について論ずる．

T字管の断面形状の定式化

まず，ロボットがT字管内に差し掛かったときの様子を模式図を用いて図3.38示す．T字管は2つの直管を繋げた構造になっているため，座標系 XYZ の原点をこれら2つの直管の中心線の交点に定める．ただし，屈曲動作のための関節は Z 軸上を移動するものと仮定する．このとき，ローテーターが占めることのできる空間は図3.38の破線を通る平面で配管を切ったときの断面に相当する．T字管の断面は図3.39の

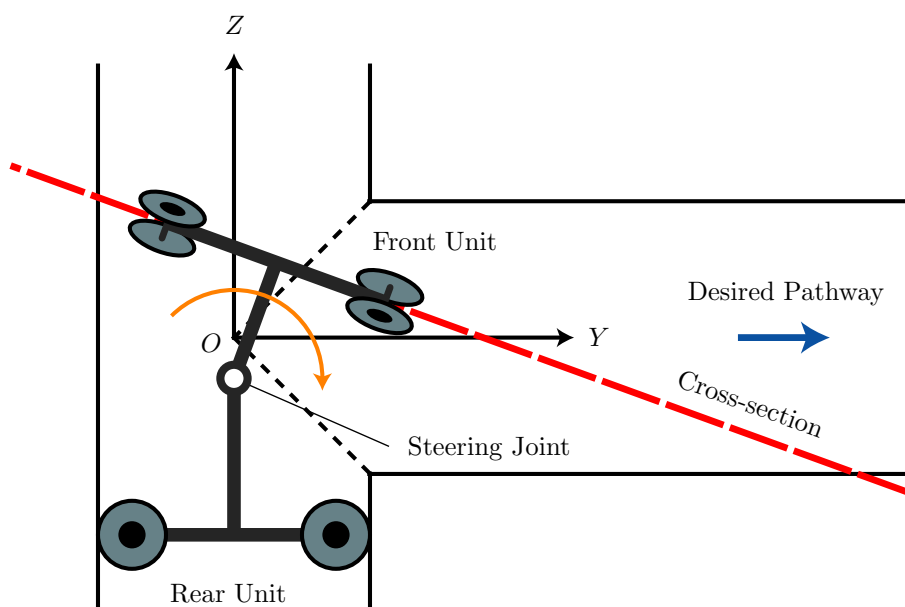


図 3.38: Cross-section of a T-branch

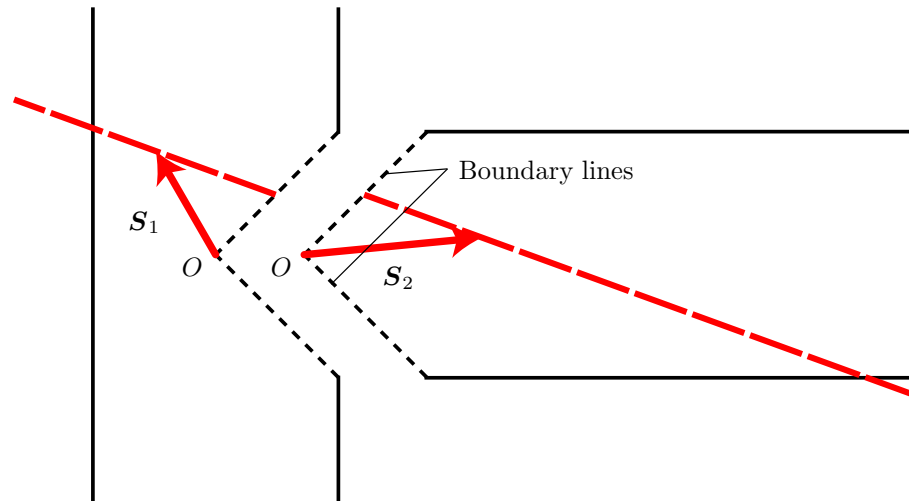


図 3.39: Division of a T-branch

ように 2 つの直管の断面を境界線に合わせて繋ぐことによって表すことができ、図のベクトル \mathbf{S}_1 及び \mathbf{S}_2 をこれら 2 つの直管の断面ベクトルとする。

直管の断面ベクトルは図 3.40 に示すように X 軸周りにいくらか傾けた平面で直管を切ったときの断面で表され、形状は楕円となる。図中の変数 θ_p , ϕ_j , \mathbf{S} はそれぞれ Z 軸周りの回転角度、切断面の傾き角、断面ベクトルを表している。 ϕ_j はちょうどロボットの屈曲角度に相当する。図 3.40 の幾何学的関係より、断面ベクトル \mathbf{S} は以下のように求めることができる。

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} R_p \cos \theta_p \\ R_p \sin \theta_p \\ -R_p \sin \theta_p \tan \phi_j \end{bmatrix} \quad (3.74)$$

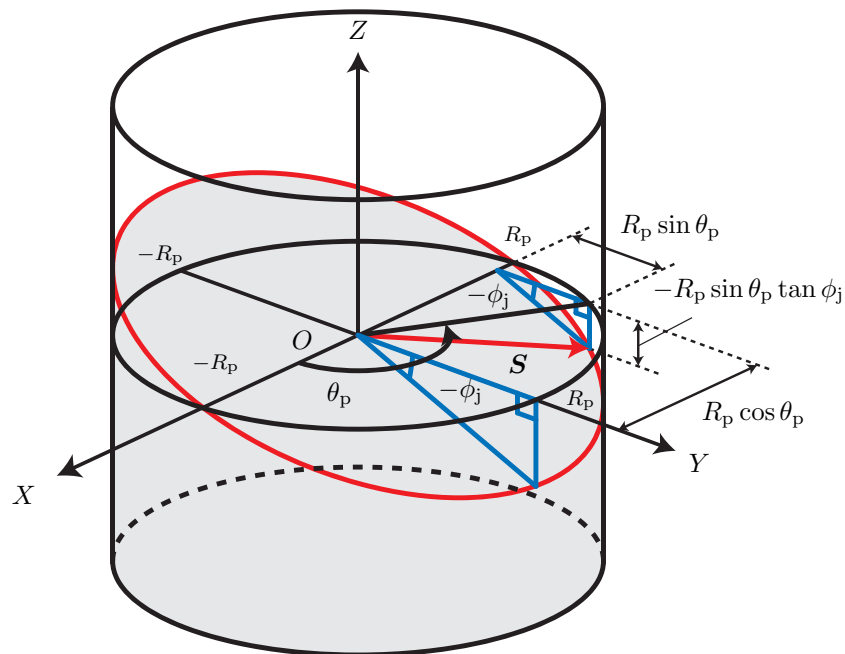


図 3.40: Angled cross-section of a straight pipe

次に，式 (3.74) で求めた直管の断面ベクトルを基に T 字管の断面ベクトル \mathbf{S}_1 及び \mathbf{S}_2 を導出する．図 3.41 はロボットが T 字管内で屈曲動作を行う際の簡易図を表している．直線 C は YZ 平面と切断面の交線を表している． $z = y$ 及び $z = -y$ は 2 つの断面の境界線に相当する．また， L_f ， z_j ， y_1 ， z_1 ， y_b ， z_b ， y_t ， z_t はそれぞれ屈曲関節からロボットの先端までの距離，屈曲関節の Z 座標，直線 C と Y 軸の交点，直線 C と Z 軸の交点，境界線と切断面の交点の Y 座標及び Z 座標，ロボットの先端の Y 座標及び Z を表している．ベクトル \mathbf{S}_1 は \mathbf{S} を Z 軸方向に z_1 だけ移動することによって，以下のように求められる．

$$\mathbf{S}_1 = \begin{bmatrix} R_p \cos \theta_1 \\ R_p \sin \theta_1 \\ -R_p \sin \theta_1 \tan \phi_j + z_1 \end{bmatrix} \quad (3.75)$$

θ_1 は Z 軸周りの回転角度を表している．移動距離 z_1 は図 3.41 の幾何学的関係から

$$z_1 = z_j + \frac{L_f}{\cos \phi_j} \quad (3.76)$$

で与えられる．同様の方法でベクトル \mathbf{S}_2 と y_1 は以下のように求めることができる．

$$\mathbf{S}_2 = \begin{bmatrix} R_p \cos \theta_2 \\ R_p \sin \theta_2 \tan(90^\circ - \phi_j) + y_1 \\ -R_p \sin \theta_2 \end{bmatrix} \quad (3.77)$$

$$y_1 = \frac{z_1}{\tan \phi_j} \quad (3.78)$$

ただし，ベクトル \mathbf{S}_2 の直管は Y 軸方向に伸びる円筒形のため， θ_2 は Y 軸周りとなっており，切断面の傾き角は $90^\circ - \phi_j$ となっている．

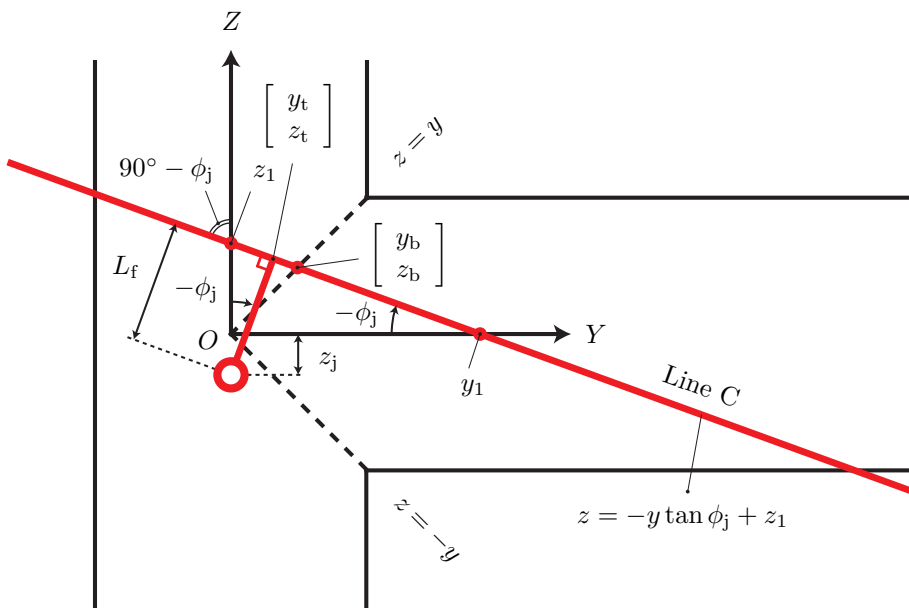


図 3.41: Simplified model of steering process in a T-branch

直線 C と境界線 (Z 軸正に位置する) は

$$\begin{cases} z = -y \tan \phi_j + z_1 \\ z = y \end{cases} \quad (3.79)$$

で与えられる. よって y_b 及び z_b は

$$z_b = y_b = \frac{z_j \cos \phi_j + L_f}{\sin \phi_j + \cos \phi_j} \quad (3.80)$$

で表すことができる. これらの y_b と z_b の値を用いると, 図 3.42 のように T 字管の断面形状を表すための θ_1 と θ_2 の範囲を求めることができる. θ_{b1} 及び θ_{b2} は 2 つの直管の境界線に対応する角度を表しており, それぞれ以下の式で求められる.

$$\theta_{b1} = \sin^{-1} \frac{y_b}{R_p} \quad (3.81)$$

$$\theta_{b2} = \cos^{-1} \frac{z_b}{R_p} \quad (3.82)$$

以上の結果から θ_1 及び θ_2 の範囲は

$$0 \leq \theta_1 \leq \theta_{b1}, 180^\circ - \theta_{b1} \leq \theta_1 < 360^\circ \quad (3.83)$$

$$0 \leq \theta_2 \leq \theta_{b2} + 180^\circ, 360^\circ - \theta_{b2} \leq \theta_2 < 360^\circ \quad (3.84)$$

で表すことができ, これらを式 (3.75) 及び (3.77) に代入し, 2 つの直管の断面をつなぎ合わせると T 字管の断面形状を求めることができる.

以上で求めた断面形状はローテーターが配管内壁面と全く接触していない状態で屈曲動作を行ったときのものであり, 実際には屈曲後にローテーターの一部が次の直管に接触することになる. このような場合, ローテーターは図 3.43 に示すように接触点を支点として回転し, スターター (後部ユニット) を Z 軸正の方向に引っ張る動作が生じる. ローテーターの車輪と配管の間の摩擦が十分であると仮定すると, この接触点は動かないため, 断面は接触点を通る直線 C に従うことになる. この接触点の Y

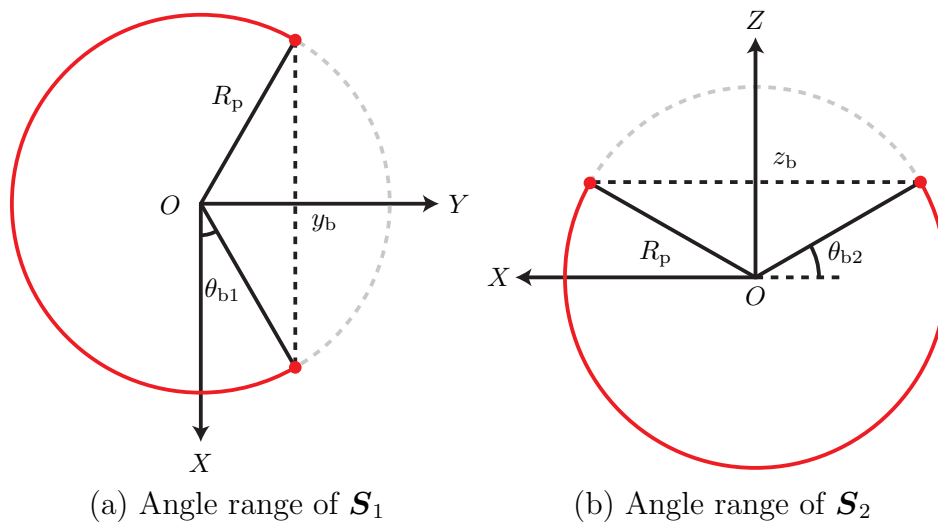


図 3.42: Corresponding angles of boundary between two pipes

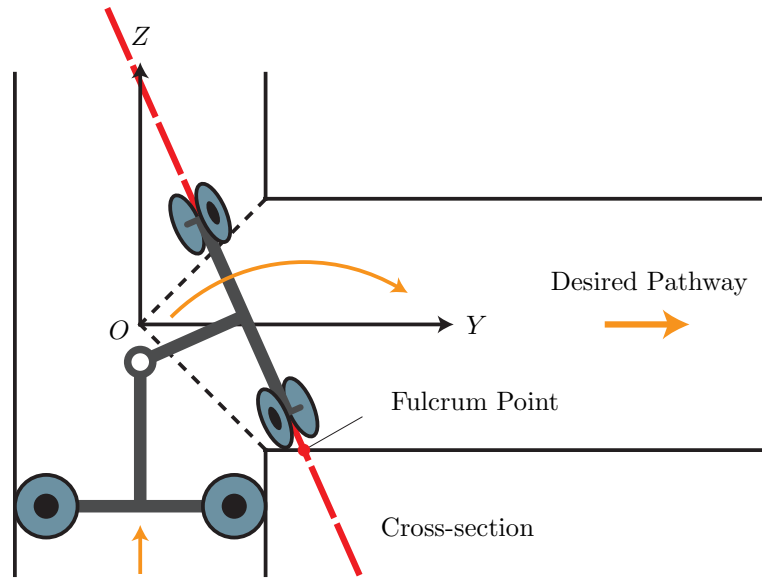


図 3.43: Turning around a fulcrum point

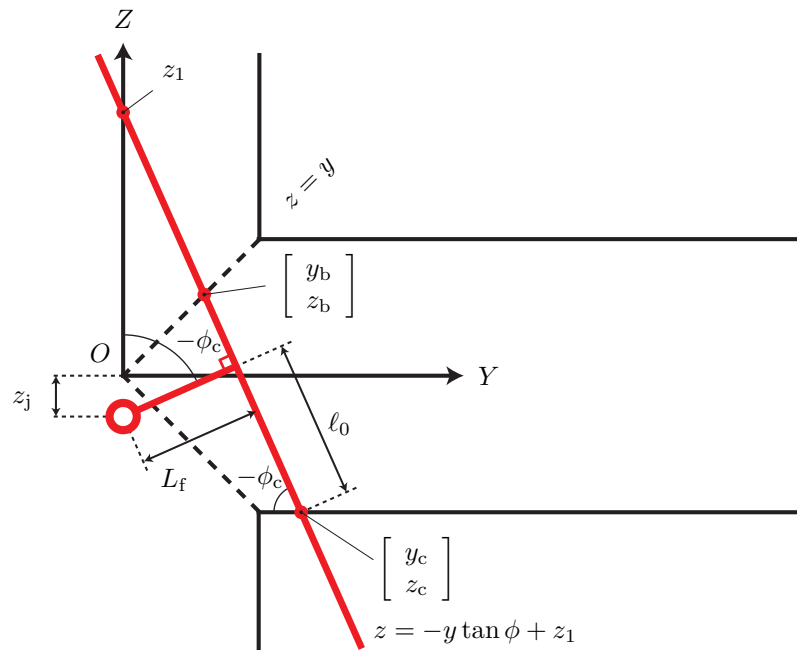


図 3.44: Front unit when the arm touches inner wall of the next pipe

座標 y_c 及び Z 座標 z_c は、ローターの腕の伸縮を無視した場合 (腕の長さを自然長とした場合), 図 3.44 に示すように幾何学的関係から容易に求めることができる。

$$\begin{bmatrix} y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_f \sin \phi_c + l_0 \cos \phi_c \\ z_j + L_f \cos \phi_c - l_0 \sin \phi_c \end{bmatrix} \quad (3.85)$$

l_0 及び ϕ_c はそれぞれ腕の自然長, ローターの一部が次の直管に接触しているときの関節の屈曲角度を表している。接触点は $z = -R_p$ 上にあるため, $z_c = -R_p$ が得られる。これを式 (3.85) の Z 座標の式へ代入すると, ϕ_c は以下の式で表すことが

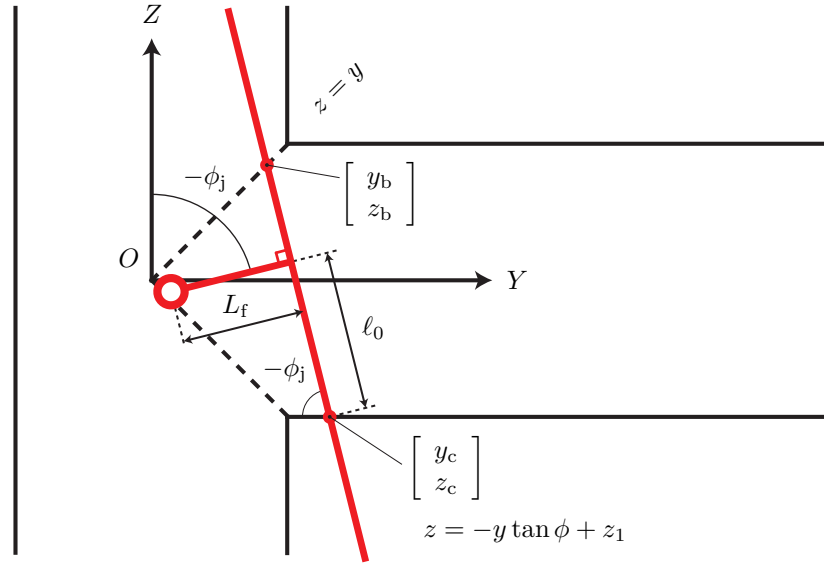


図 3.45: Front unit when $\phi_c < \phi$

できる.

$$\phi_c = \arcsin \frac{R_p + z_j}{\sqrt{\ell_0^2 + L_f^2}} + \arcsin \frac{L_f}{\sqrt{\ell_0^2 + L_f^2}} \quad (3.86)$$

腕が配管内に接触した後、ローテーターは図 3.45 のように支点周りに回転することになる. このとき, 図 3.44 で示した z_1 は ϕ_j の関数として以下のように再定義される.

$$z_1 = y_c \tan \phi_j - R_p \quad (3.87)$$

これを式 (3.79) に代入すると, 境界線と切断面の交点の Z 座標が以下のように再導出できる.

$$z_b = y_b = \frac{y_c \tan \phi - R_p}{1 + \tan \phi_j} \quad (3.88)$$

$\phi_j \leq \phi_c$ のとき, θ_{b1} 及び θ_{b2} は式 (3.80) によって計算され, $\phi_c < \phi_j$ のとき, θ_{b1} 及び θ_{b2} は式 (3.88) によって計算される.

以上の式 (3.75) 及び (3.77) によって得られる T 字管の断面形状を図 3.46 に示す. 屈曲関節の角度 ϕ_j は 10° 刻みで 0° から 90° まで変化させた. なお, 寸法パラメーターには $R_p = 62.5$, $L_f = 70$, $\ell_0 = 67$, $z_j = -50$ を用いた. これらは後述の実機のものと同じである.

伸縮機構の拡張範囲

T 字管内でロボットが屈曲する際, その走破性はローテーターが 2 つの断面によって囲まれる最も狭い空間を通れるか否かで判断することができる. この空間は図 3.47 に示すような 2 つの角の間の幅によって決まる. もし, ローテーターのサイズがこの幅よりも大きければ屈曲動作が妨げられてしまう.

式 (3.75) の X 座標と式 (3.83) の範囲を用いることで, この 2 つの角の間の幅 w は以下のように定義することができる.

$$w = 2R_p \sin \theta_{b1} \quad (3.89)$$

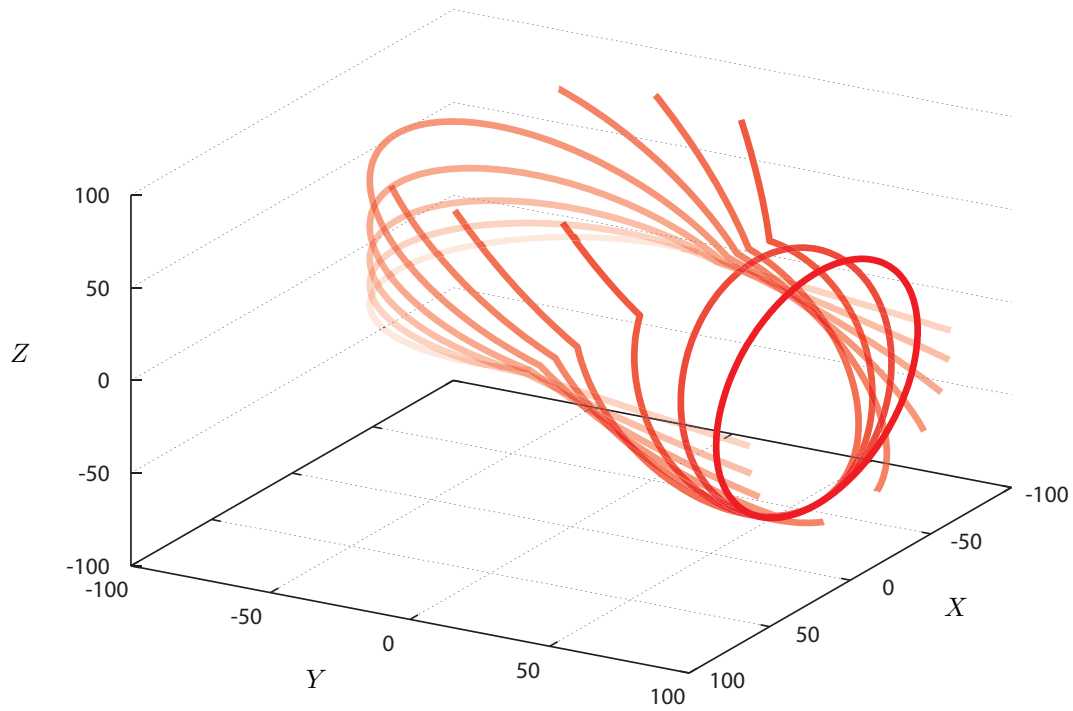


図 3.46: Transition of cross-section of a T-branch

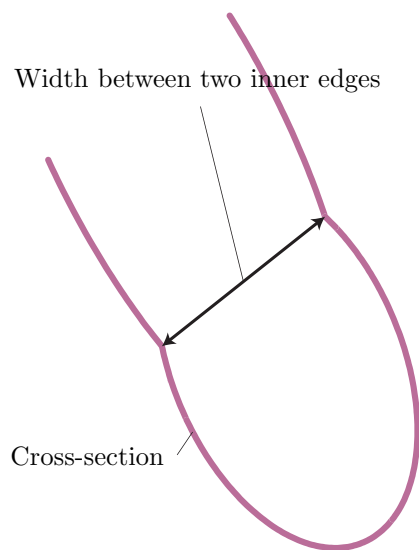


図 3.47: Width between two inner edges

また，図 3.41 より，ローテーターの先端の座標は

$$\begin{bmatrix} y_t \\ z_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_f \sin \phi_j \\ L_f \cos \phi_j + z_j \end{bmatrix} \quad (3.90)$$

で与えられる．ローテーターの先端が 2 つの直管の境界線上 ($z = y$) を通るとき，Y 座標と Z 座標は等しくなるので， $z_t = y_t$ が成り立つ．式 (3.90) を $z_t = y_t$ に代入すると，ローテーターの先端が 2 つの直管の境界線上に位置するときの屈曲角度 ϕ_t が求められる．

$$\phi_t = \frac{1}{2} \sin^{-1} \left\{ 1 - \left(\frac{z_j}{L_f} \right)^2 \right\} \quad (3.91)$$

$\phi = \phi_t$ のときローテーターは最も空間的に拘束されることになる．言い換えれば，ローテーターがこの状態を通ることができれば配管内壁面に移動を妨げられることなく屈曲動作を行えることになる．

ローテーターの大きさは直径ではなくその高さで決まるため，図 3.48 のように定義される．ローテーターの高さ h は伸縮機構の腕の先端の最大値と最小値によって決まり， θ_a の値によって周期的に変化する．例えば， $0 \leq \theta_a < 30^\circ$ のとき，高さ h は腕 2 と 3 によって決まる． θ_a が 30° を超えると腕の最大値が腕 2 のものから腕 1 のそれに切り替わる．さらに 60° 回転 ($90^\circ \leq \theta_a < 120^\circ$) すると，腕の最小値が腕 3 のものから腕 2 のそれに切り替わる．3 つの腕は放射状に 120° 間隔で取り付けられており，ローテーターは 120° 周期で同じ姿勢となる．よって，高さ h は $0 \leq \theta_a < 120^\circ$ の範囲で定義すれば良く，

$$\begin{aligned} h &= \sqrt{3}l_0 \cos \theta_a, & (0 \leq \theta_a < 30^\circ) \\ h &= \sqrt{3}l_0 \sin(\theta_a + 30^\circ), & (30^\circ \leq \theta_a < 90^\circ) \\ h &= \sqrt{3}l_0 \sin(\theta_a - 30^\circ), & (90^\circ \leq \theta_a < 120^\circ). \end{aligned} \quad (3.92)$$

で表される．式 (3.92) から， θ_a を回転させたときのローテーターの高さを図 3.49 に示す．なお，腕の自然長は $l_0 = 67$ とした．

このグラフからローテーターの高さの最大値と最小値は 60° 周期で同じ値をとることがわかる．この高さの最大値 h_{\max} は表 3.2 に示すように腕の自然長 l_0 に依存す

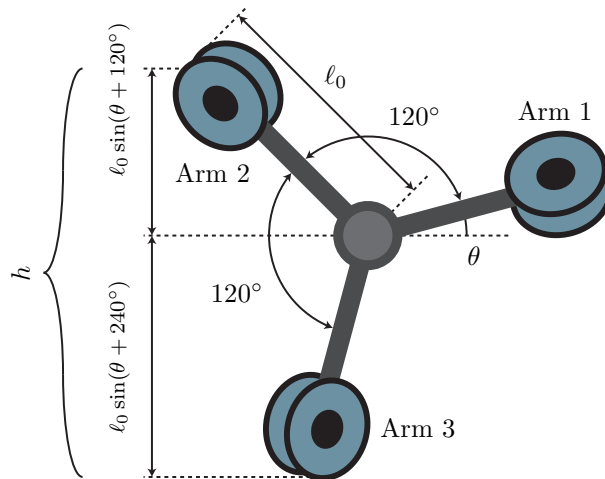


図 3.48: Size of a front unit

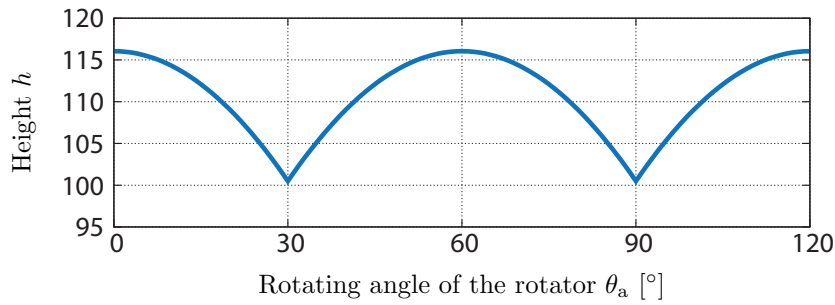


図 3.49: Height with respect to θ , when $l_0 = 67$

表 3.2: Maximum height of the rotator (front unit)

l_0	64	65	66	67	68	68
h_{\max}	110.85	112.58	114.32	116.05	117.78	119.51

る。これらの高さの最大値 h_{\max} と先に求めた 2 つの角の間の幅 w 、及び屈曲関節の位置 z_j の関係を表すと図 3.50 のようになる。図中の曲線は屈曲関節の位置 z_j を -65 から 5 刻みで増加させたときの 2 つの角の間の幅 w を示している。今回は、 ϕ_j が ϕ_c に達した時点で計算を終了した。縦方向に並ぶ複数の点線は最も空間的に拘束される $\phi_j = \phi_t$ の状態のときの 2 つの角の間の幅 w を示している。水平方向に並ぶ複数の点線は腕の自然長 l_0 を変えたときのローテーターの高さの最大値 h_{\max} を示している。最も屈曲動作を行い易い関節の位置は $z_j = -L_f$ ($z_j = -70$) であり、このとき 2 つの角の間の幅 w が最大となっている。また、ローテーターの先端は屈曲動作を行ってすぐに最も空間的に制約される状態を抜け出すことができる。しかし、螺旋駆動型配管検査ロボットは T 字管に差し掛かると一部の車輪の接触が離れるため、屈曲位置を正確に $z_j = -70$ に制御することは難しい。水平の点線 h_{\max} が 2 つの角の間の幅 w に位置していればローテーターは容易に屈曲を行うことができ、屈曲位置を正確に制御できない場合は、この範囲で動作させることが望ましい。例えば、 $l_0 = 67$ のときは $z_j = -55$ の位置までで屈曲動作を開始しなければならないことになる。

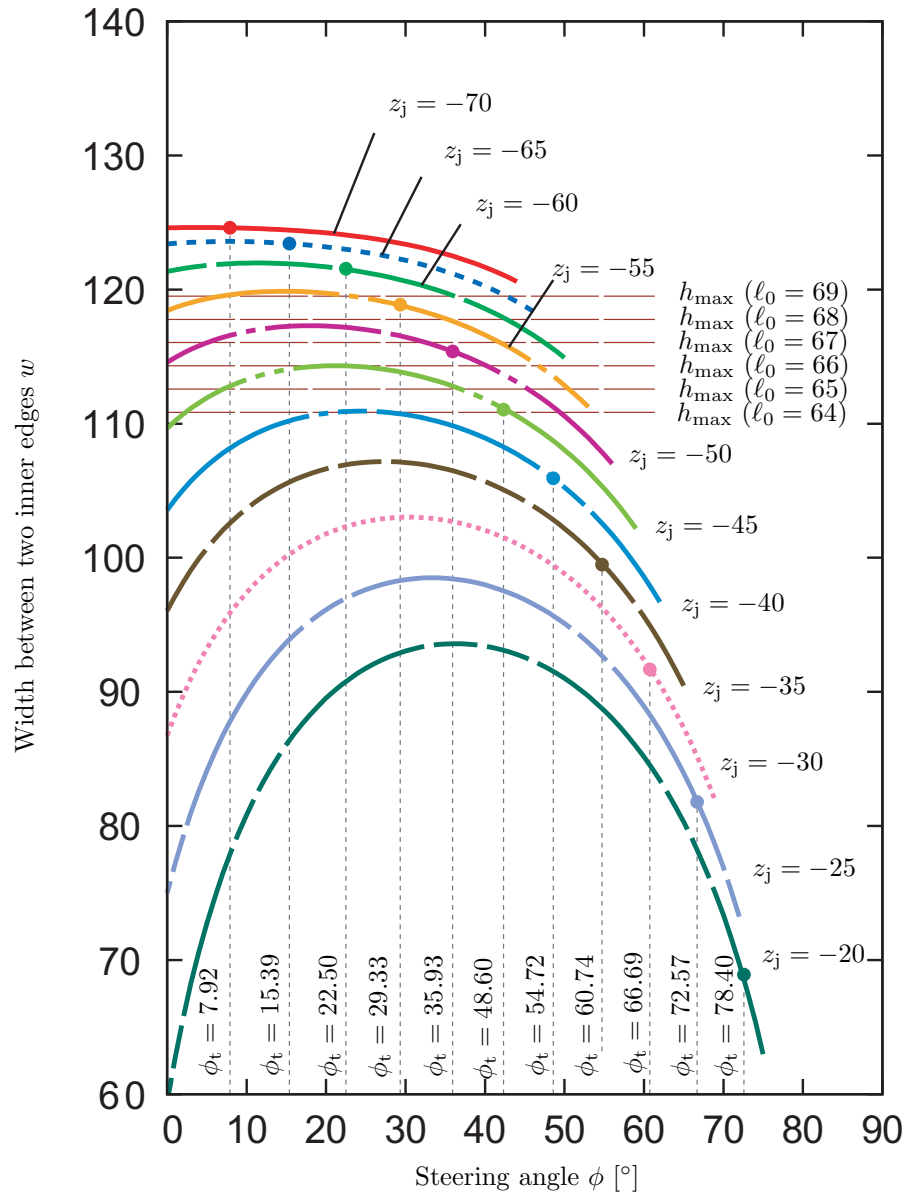


図 3.50: Steerability in a T-branch

3.2.2 3モジュール型の場合

3モジュール型配管検査ロボットがT字管内に入ると、それぞれのモジュールの接触状態は曲管のように定まらない。そのため、図3.51のようにどのような接触状態であってもロボットを旋回させられるよう各モジュールを動作させなければならない。このような場合、伸縮機構の腕の長さ l_a を推定することは難しい。そこで本節では並進速度を発生させずにロボットの重心周りの角速度のみを発生させる場合を考え、同時に運動学に伸縮機構の腕の長さ l_a を必要としない方法を用いる。

まず、式(2.45)の v_c の値を0とし、これを計算すると、

$$\dot{\theta}_{w1} = \frac{l_a}{R_w}(\omega_x \sin \theta_a - \omega_y \cos \theta_a) \quad (3.93)$$

$$\dot{\theta}_{w2} = \frac{l_a}{2R_w} \left\{ \omega_x(\sqrt{3} \cos \theta_a - \sin \theta_a) + \omega_y(\cos \theta_a + \sqrt{3} \sin \theta_a) \right\} \quad (3.94)$$

$$\dot{\theta}_{w3} = -\frac{l_a}{2R_w} \left\{ \omega_x(\sqrt{3} \cos \theta_a + \sin \theta_a) - \omega_y(\cos \theta_a - \sqrt{3} \sin \theta_a) \right\} \quad (3.95)$$

が得られる。ここで、各モジュールのモーターの回転速度である $\dot{\theta}_{w1}$, $\dot{\theta}_{w2}$, $\dot{\theta}_{w3}$ の比を考える。式(3.93), (3.94), (3.95)から3つの比を求めると、それぞれの値は l_a/R_w で割ることができるため、結果的に

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_{w1} : \dot{\theta}_{w2} : \dot{\theta}_{w3} &= 2(\omega_x \sin \theta_a - \omega_y \cos \theta_a) \\ &: \omega_x(\sqrt{3} \cos \theta_a - \sin \theta_a) + \omega_y(\cos \theta_a + \sqrt{3} \sin \theta_a) \\ &: \omega_x(\sqrt{3} \cos \theta_a + \sin \theta_a) - \omega_y(\cos \theta_a - \sqrt{3} \sin \theta_a) \end{aligned} \quad (3.96)$$

が得られる。変数はロボットのロール角 θ_a , X軸及びY軸周りの角速度 ω_x , ω_y のみとなり、伸縮機構の腕の長さ l_a やプーリーの半径 R_w に関係なくこれら3つのパラメータを用いて各モジュールのモーターの回転速度の比を求めることができる。この方法は3つのモーターの回転速度 $\dot{\theta}_{w1}$, $\dot{\theta}_{w2}$, $\dot{\theta}_{w3}$ とX軸及びY軸周りの角速度 ω_x , ω_y の関係を正確に表していないが、モーターの回転速度の最大値をあらかじめ

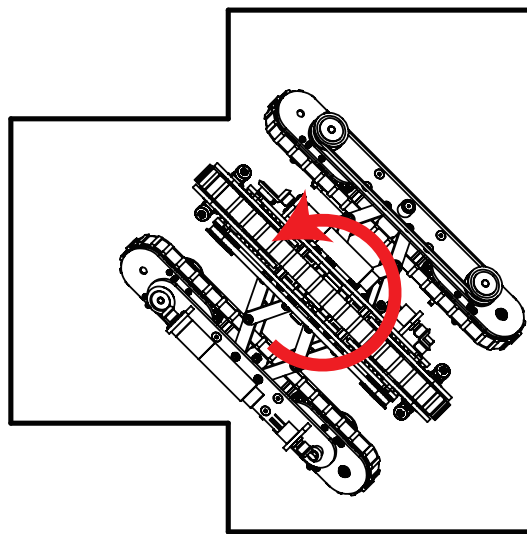


図 3.51: Steering motion in a T-branch

設定しておき、その値を基に 3 つの速度比を求めることでロボットを向かせたい方向に回転させることができる。なお、モーターの回転速度の最大値には定格電圧を加えたときのものを用いれば良い。

3.3 まとめ

本章では、曲管内走行及び T 字管内走行の基礎理論について述べた。曲管内走行時は、螺旋駆動型と 3 モジュール型のいずれの場合も配管内の空間的な制約が重要になることを示し、2 次元モデルから 3 次元の断面図へと展開する共通の理論を用いて伸縮機構の空間的な制約を明らかにした。

一方、T 字管内走行時は、経路が連続していないため、ロボットと配管の接触状態を推定することが困難である。そのため、螺旋駆動型の場合ではロボットが屈曲動作を行うための簡易モデルを立て、ローターが次の直管へ移動するための条件(屈曲位置、腕の自然長)を示した。また、3 モジュール型の場合では第 2 章で求めた運動学式を基に、伸縮機構の腕の長さやプーリーの半径を必要としない式を導いた。

以上の結果は次章の設計で利用される。

第 4 章

配管検査ロボットの設計

本章では，連結能動関節型の1つとして開発した螺旋駆動型配管検査ロボット及び干渉駆動型の1つとして開発した3モジュール型配管検査ロボットについて述べる．

4.1 螺旋駆動型配管検査ロボットの設計

4.1.1 基本構造

開発した螺旋駆動型ロボットの外観を図 4.1 に，構造の簡易図を図 4.2 に，仕様を表 4.1 に示す．このロボットは前部ユニット（ローター），中部ユニット，後部ユニット（ステーター）に分かれており，圧縮バネによって伸縮可能な腕（伸縮機構）が3つ取り付けられている．これらの腕の先端には2輪1対の受動車輪が取り付けられており，ロボットは車輪を配管内壁面に押し付けることによって体を支えることができる．前部ユニットの車輪には傾きが設けられており，これを後部ユニットに取り付けたモーターで回転させることによって螺旋運動を行うことができる．ロボットの後部ユニットには移動用モーターと経路選択用モーターが取り付けられている．移動用モーターには Maxon 社製の 118729 を用い，減速比 24 のギアヘッド

表 4.1: Specifications of the screw-driving pipe inspection robot

Axial length [mm]	175.8
Max. and Min. diameters [mm]	129 and 109
Wheel diameter [mm]	28
Total weight [kg]	0.7
Angle of the wheel [°]	10
Max velocity of the robot [m/s]	0.5
Norminal torque of the driving motor [Nmm]	98.2
Stall torque of the driving motor [Nmm]	717.6
Norminal torque of the steering motor [Nmm]	458.6
Stall torque of the steering motor [Nmm]	1461.6



図 4.1: Overview of the screw-driving pipe inspection robot

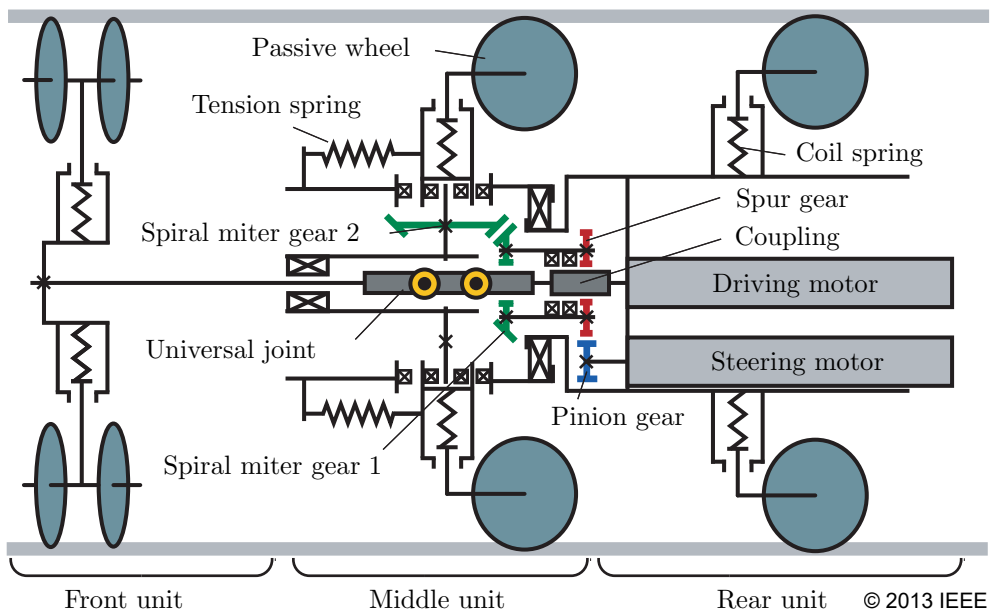


図 4.2: Schematic of the system

134777を用いた。経路選択用モーターには同じく Maxon 社製の 118700 を用い、減速比 84 のギアヘッド 110323 を用いた。移動用モーターの動力は前部ユニットにユニバーサルジョイントを介して直結されている。経路選択用モーターは平歯車 (減速比 1:2) を介して中部ユニットのマイタギアへと繋がっている。これによりロボットは Yaw 方向に対して体を $\pm 90^\circ$ 屈曲させることができ、ユニバーサルジョイントによって屈曲時にも移動用モーターの回転を伝達することができる。通常、3次元空間内で上下左右 (Pitch, Yaw) にロボットを屈曲させるためには合計2つのモーターが必要になる。しかし、配管内では空間的に制限されるため、2つのモーターを用いる代わりに差動機構の原理を用いて上下左右の屈曲動作を実現している。この原理を3つのモードに分けて解説する。

4.1.2 3つの動作モード

開発した螺旋駆動型配管検査ロボットの動作は以下のように螺旋駆動モード、経路選択モード、Roll 回転モードに分けることができる。

螺旋駆動モード

螺旋駆動モードでは移動用モーターの正転と逆転を行うことにより、前進と後退を行うことができる。図 4.3 に螺旋駆動モードにおける動力の流れを示す。後部ユニットに取り付けられたモーターのトルクはユニバーサルジョイントを介して前部ユニットを回転させる。このとき、中部ユニットと後部ユニットはステーター (固定子) としてはたらし、前部ユニットの回転の反作用を支えている。

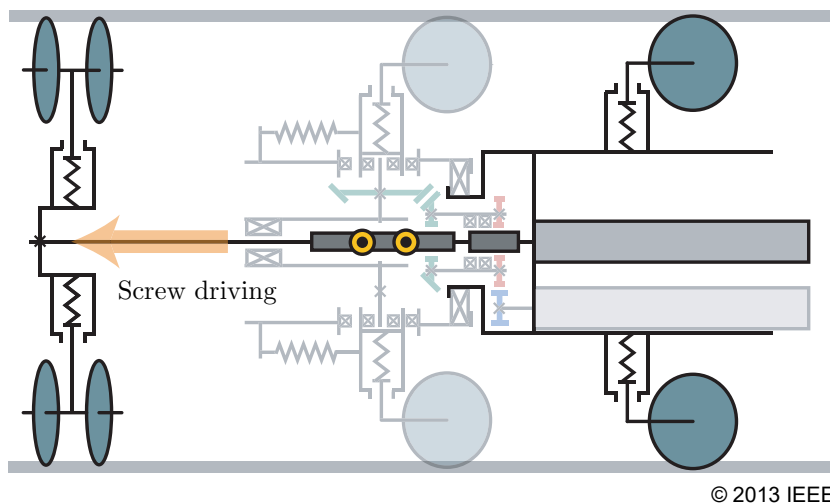


図 4.3: Screw-driving mode

経路選択モード

経路選択モードでは、ロボットは中部ユニットの腕を軸にして前部ユニットを屈曲させることができる。経路選択用モーターの動力はマイタギアを介して Roll 方向から Yaw 方向へと変換している。このときの動力の流れを図 4.4 に示す。中部ユニッ

トはYaw回転(マイタギアの自転のみ)とRoll回転(マイタギアの公転)の両方向へ力を受けるが、車輪が摩擦によってRoll回転を抑制するため、Yaw回転のみを行うことができる。

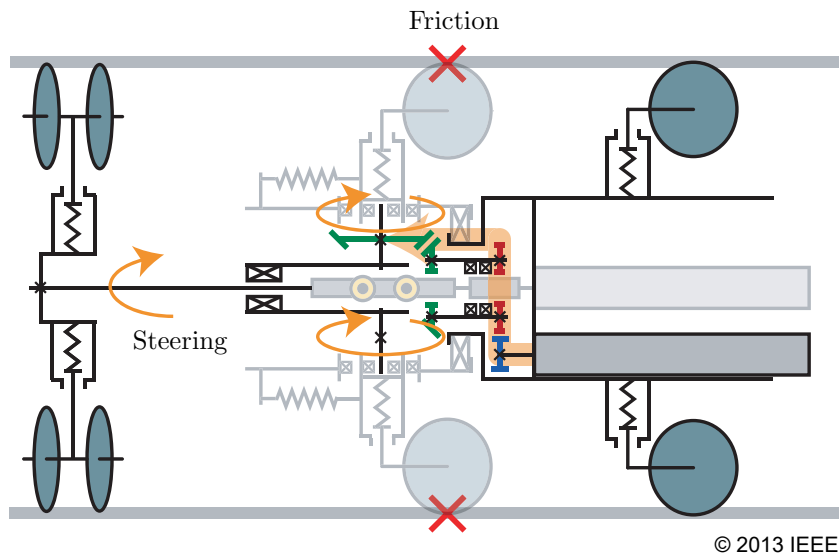


図 4.4: Steering mode

Roll 回転モード

Roll 回転モードでは経路選択モードと同じ動力を利用して経路選択の向きを変える仕組みになっている。まず、ロボットが経路選択用モーターを使用して体を屈曲させる。このとき、T字管などの左右に十分な空間のある場所では前部ユニットをYaw軸周りに振ることができる。しかし、直管内では上下左右どの方向にも壁があるため、ロボットは屈曲させることができない。この状態で経路選択用モーターを駆動させるとその動力は中部ユニットのRoll回転(マイタギアの公転)へと伝わり、屈曲動作の方向そのものを環境を利用して受動的に変えることができる。Roll 回転モードにおける動力の流れを図 4.5 に示す。

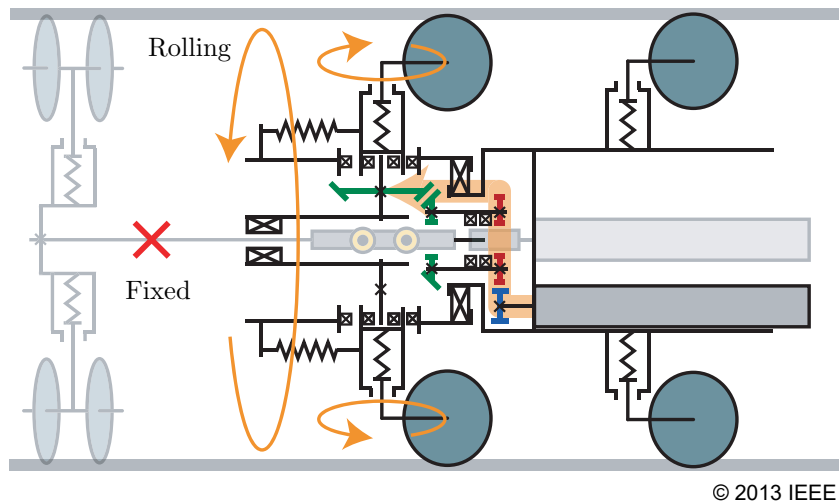


図 4.5: Rolling mode

伸縮機構

伸縮機構は図4.6 (a)に示すように、スライディングロッドがコンテナの中を上下に移動する構造になっており、移動距離はコンテナの溝の長さによって決まる。また、図4.6 (b)に示すように中部ユニットの圧縮バネの下には引張りバネを固定したブロックが取り付けられている。この引張りバネによって走行時には脚が常にロボット前方を向くようになっている。一方、中部ユニットが回転する際は、脚がキャスターのように、Roll回転の方向に沿って向きを変えることができる。



(a) A single elastic arm

(b) Middle arm

図 4.6: Elastic arms

4.1.3 バネ剛性と腕の長さの設計

次にバネ剛性と腕の長さの設計について述べる。螺旋駆動型配管検査ロボットは曲管内において伸縮機構を伸縮させなければならない。このとき、バネの力が強すぎればモーターは回転できずに止まってしまい、曲管内を進むことができない。バネの力はバネ剛性 k と伸縮機構の腕の長さの変位によって決まり、この変位は腕の自然長 l_0 と腕の長さ l_a を用いて $l_0 - l_a$ で表される。曲管内走行時の腕の長さ l_a は既に前章の解析で求めている。そこで、この腕の長さ l_a を基にバネ剛性、腕の自然長、モータートルクの関係論じていく。

図4.7は伸縮機構の長さ l_a が回転角度 θ_a の変化に伴ない伸縮する様子を表している。このとき、先端の車輪には、バネによって押し付けられる力 F_s 、モーターから受ける力 $F_r \cos \alpha$ 、及び垂直抗力 N_c がはたらいっている。なお、今回、車輪の半径は無視できるほど小さいものと仮定している。ロボットが螺旋駆動を行うためには、モーターにより腕を縮めようとする力がバネにより腕を伸ばそうとする力よりも大きくなる必要がある。この条件は以下の式で与えられる。

$$F_r \cos \alpha \cos \beta > F_s \sin \beta \quad (4.1)$$

モーターによる力 F_r は伸縮機構の腕の長さ l_a とモータートルク τ_m を用いて $F_r = \tau_m / 3l_a$ で表すことができる。分母の3は腕の数が3つであることを意味している。

また、バネによる力は $F_s = k(\ell_0 - \ell_a)$ で表すことができる。これらを式(4.1)に代入すると、前部ユニットを回転させるためのトルク τ_m の値は

$$\tau_m = \frac{3k\ell_a(\ell_0 - \ell_a) \tan \beta}{\cos \alpha} \tag{4.2}$$

で求めることができる。なお、 $\tan \beta$ の値は

$$\tan \beta = \frac{d\ell_a}{d\theta_a} \tag{4.3}$$

で与えられる。

一方、前章の図3.31から、腕の自然長 ℓ_0 は64 [mm] 以上でなければすべての車輪が接触できなくなってしまう。ロボット単体の移動であれば大きな問題とはならないが、検査装置等を牽引する場合、十分な推進力を得られなくなる可能性があるため、すべての車輪は接触していることが望ましい。図4.8に螺旋駆動型配管検査ロボットの腕の構造を示す。 $R_w, R_a, R_b, \ell_d, \ell_s$ はそれぞれ、車輪の半径、車輪の軸径、前部ユニットのベース半径、腕の軸の長さ、バネの長さを表している。これらを実測すると、 $R_w = 14$ [mm], $R_a = 3.0$ [mm], $R_b = 11$ [mm] となり、 ℓ_0 の値は

$$\ell_0 = \ell_s + R_w - R_a + R_b \tag{4.4}$$

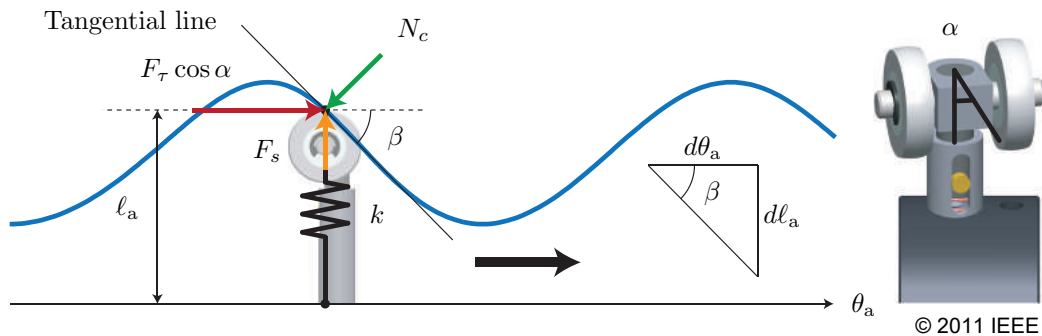


図 4.7: Forces that act when the radius is compressed

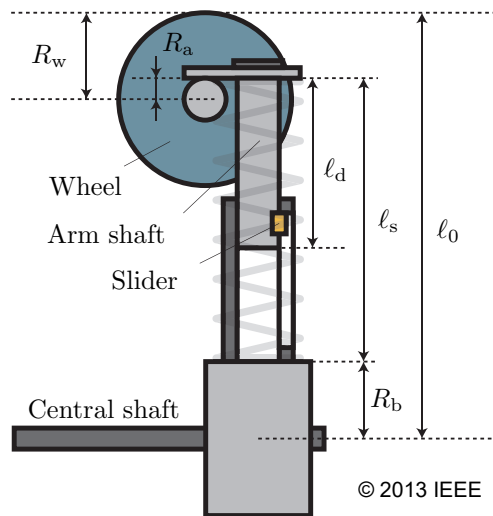


図 4.8: Structure of the arm

で計算できる. そのため, 腕の自然長 l_0 が 64 [mm] 以上となるためにはバネの長さ l_s は 42 [mm] 以上でなければならない. しかし, この大きさの標準的なバネは 5.0 [mm] 単位で製造されているため, $l_s = 42$ [mm] を選択することができない. そこで, バネの長さは $l_s = 45$ [mm] のものを用い, 曲管内でも車輪の接触を保てるような長さ (自然長は $l_0 = 67.0$ [mm]) に設計した. この自然長を式 (4.2) に代入して計算したモータトルクの結果を図 4.9 に示す. バネ定数の値はそれぞれ $k = 0.1$ [N/mm], $k = 0.3$ [N/mm], $k = 0.5$ [N/mm], $k = 1.0$ [N/mm] を用いており, これらは量産されている標準的な仕様と一致する. 図のトルクの値は何度も正負を行き来しながら振動を繰り返している. この負の値の部分はバネが伸びようとしている状態であり, モーターがトルクを加えなくても前部ユニットが自然に回転できることを意味する. 正の値の部分はモーターが必要とするトルクを意味するため, 実際に用いるモーターの最大トルクに合わせたバネ剛性の設計が必要になる. モーターの定格トルクは 98.2 [Nmm] (最も効率が低い回転数で動作させたときのトルク), 停動トルクは 717.6 [Nmm] となっており, 理論上は必要なトルクが 717.6 [Nmm] 以上になると移動が不可能になることを意味する. 4つのグラフのトルクの最大値はすべてこの停動トルクよりも小さな値となっている. しかし, 実際には安全率を考慮し, 停動トルクの 2分の1以下 (安全率 2 以上) や 3分の1以下 (安全率 3 以上) に設定する設計が一般的である. そのため, バネ定数には $k = 0.1$ [N/mm], $k = 0.3$ [N/mm], $k = 0.5$ [N/mm] の3つの値を用い, 安全率を 3 以上とした. 以上の結果より, 螺旋駆動型配管検査ロボットを設計する際には, 配管の空間的な制約から搭載可能なモーターを選定し, その出力可能なトルクの値に応じて必要なバネ定数の絞り込みを行えば良いことがわかる.

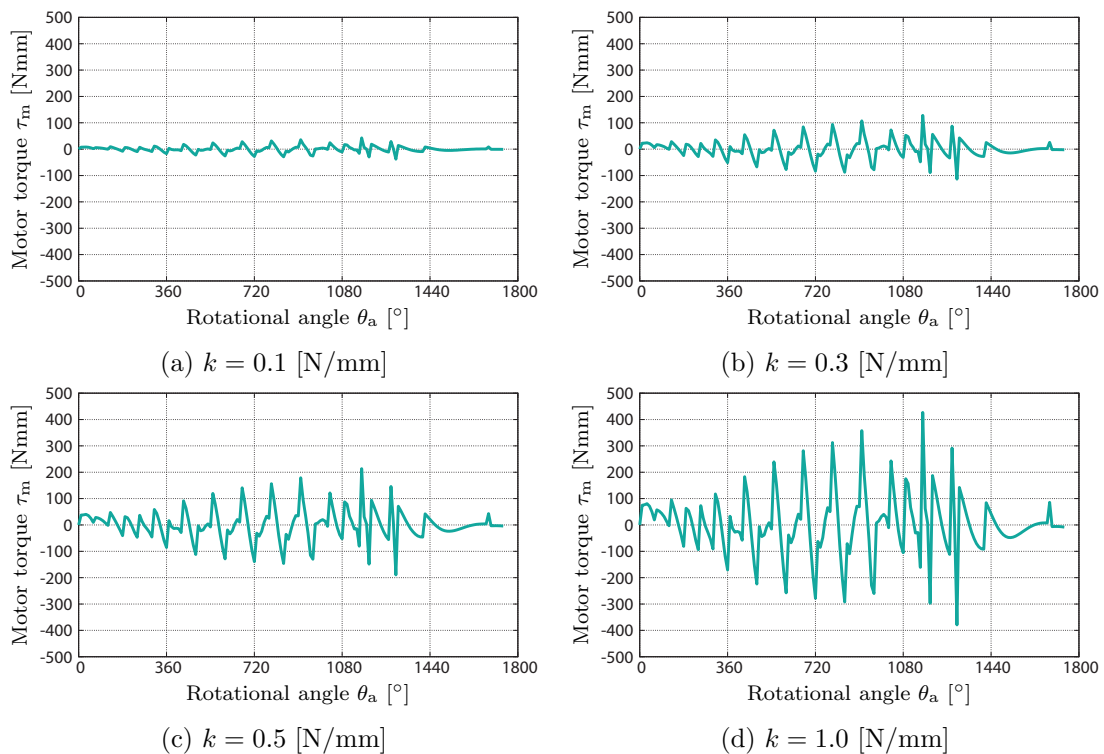


図 4.9: Motor torque required for rotation in the bent pipe

4.1.4 操作用コントローラー

図 4.10 及び図 4.11 はそれぞれ操作用コントローラーとその構成を表している。マイクロコントローラーには Microchip 社製の PIC16F88 を、モータードライバー (Hブリッジ) には東芝製の TA8429HQ を用いた。ジョイスティックは傾けた角度によって抵抗値が変化するため、この電圧値を PIC16F88 の A/D 変換機能を用いて読み取り、PWM のデューティ比を決定した。これにより、ジョイスティックの傾斜角度によって操作者が手動でモーターの速度を変えることができる。なお、傾斜角が 0 (スティックが垂直の状態) ではデューティ比を 0% に、90° (スティックを完全に倒した状態) ではデューティ比を 100% に設定している。ジョイスティックにはチャンネルが 2 つ備わっているため、1 方を移動用モーターに、もう 1 方を経路選択用モーターに使用した。このコントローラーを用いて操作者は手動でロボットを操作することができる。

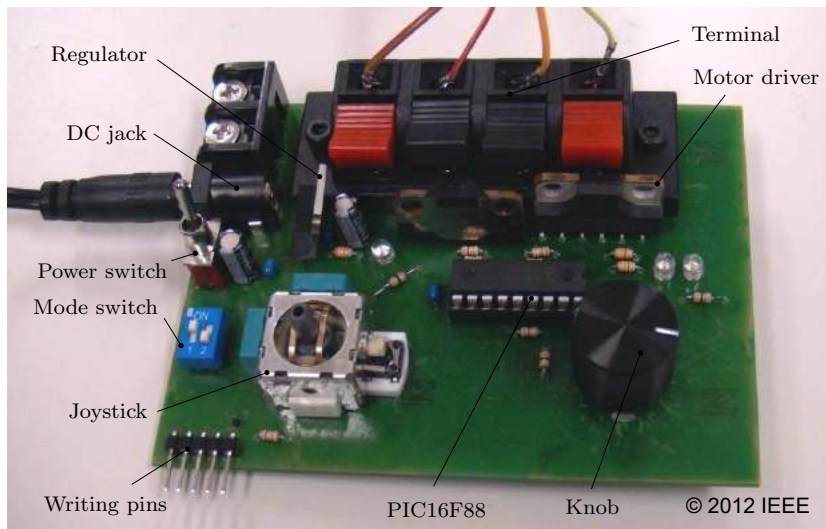


図 4.10: Overview of a controller for the screw-driving pipe inspection robot

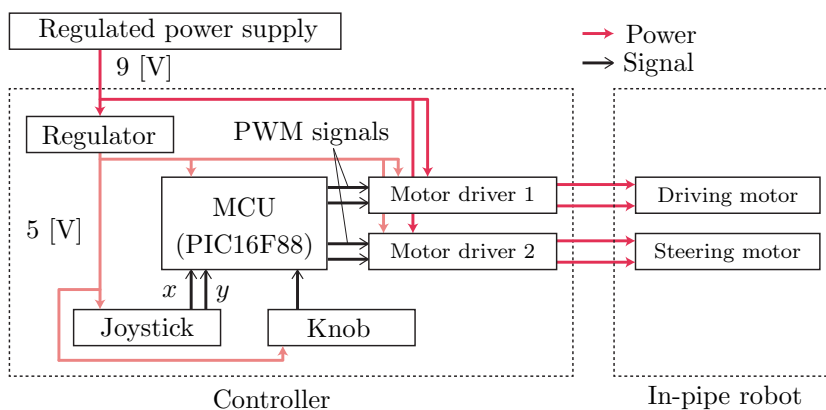


図 4.11: Configuration of a controller for the screw-driving pipe inspection robot

4.2 3モジュール型配管検査ロボットの設計

4.2.1 基本構造

開発した3モジュール型配管検査ロボットの外観を図4.12に、仕様を表4.2に示す。モーターにはMaxon社製の118730を用い、減速比84のセラミック製ギアヘッド416391を用いた。このロボットは配管軸に対して120°間隔で放射状に配置された3つのクローラモジュールと中央部の伸縮機構によって構成されている。伸縮機構には図4.13に示すようなパンタグラフとコイルバネが用いられ、ロボットの体軸方向のバネの力を配管の半径方向へ変換している。1つのクローラモジュールに対してパンタグラフ機構とコイルバネは2つずつ使用されており、それぞれの伸縮機構は放射状に120°間隔で配置されている。配管に対して水平方向に移動するスライダはバネによってパンタグラフ機構のリンクを押し、その力がクローラ中央部の

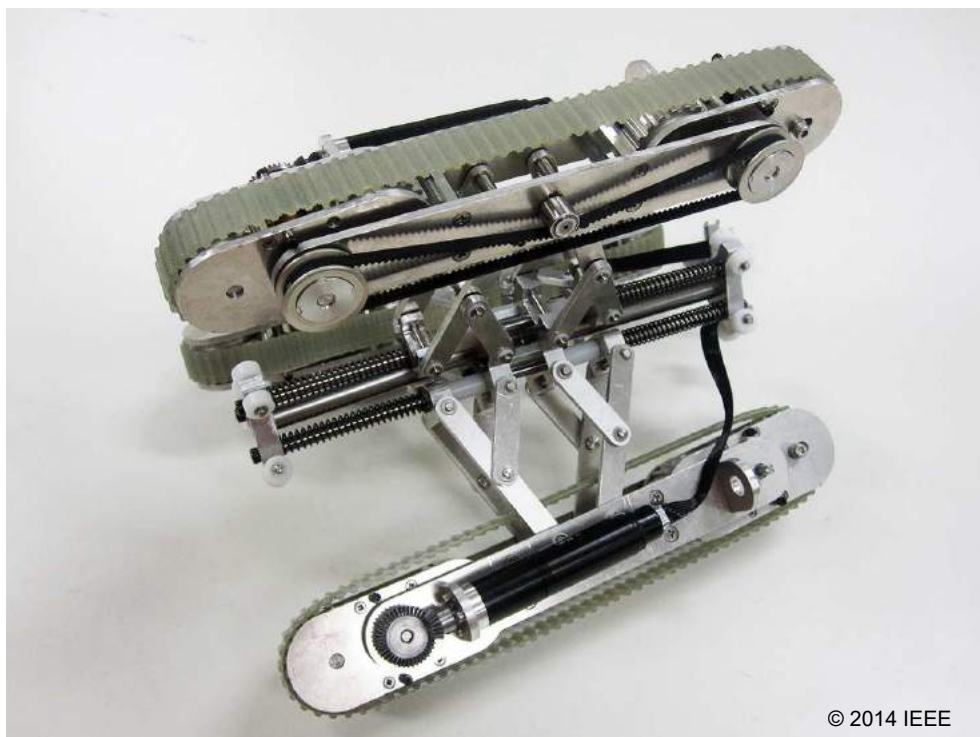


図 4.12: A mechanical model of the three modular pipe inspection robot

表 4.2: Specifications of the three modular pipe inspection robot

Adaptive diameter [mm]	$\phi 136 - \phi 202$ (Max. 226)
Axial length [mm]	235
Total weight [kg]	1.8
Max. speed of the robot [m/s]	0.23
Rated torque of the geared motor [Nmm]	331.8
Stall torque of the geared motor [Nmm]	2419.2

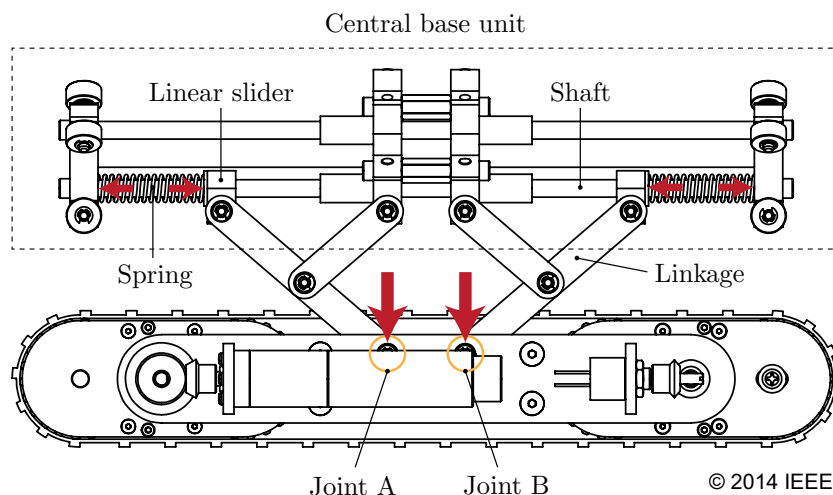


図 4.13: A pantograph mechanism used to change the diameter of the robot

関節 A と B の部分を押す構造になっている。このとき、バネの力の向きは配管に対して水平方向から半径方向へ変換される。

通常、パンタグラフ機構はスライダが持つ 1 自由度の動作の向きを 90° 変換するものとして用いる。そのため、今回のように関節 A と B の距離が一定の場合、2 つのパンタグラフを用いてもクローラの動作は伸縮の 1 自由度のみとなる。しかし、実際にはパンタグラフのそれぞれの軸に存在する 0.1 [mm] 以下の機械誤差が積み重なることによって、クローラは図 4.14 のような姿勢をとることができる。このことは文献 [18] でも言及されている。この現象が起こらなければ、クローラは常に配管に対して平行を保ったまま形状変化することになり、障害物走破性が下がってしまう。

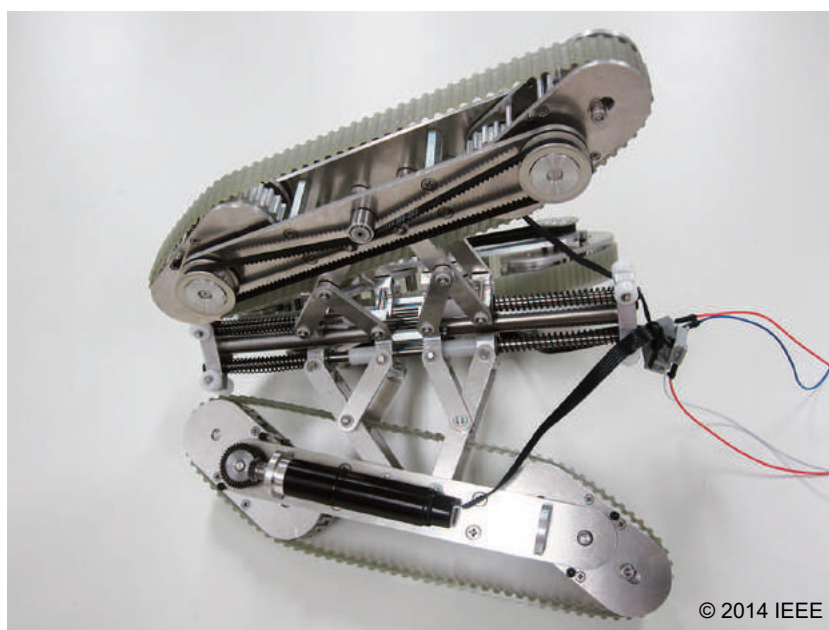


図 4.14: Uneven posture eventually generated

4.2.2 劣駆動平行四辺形クローラ

3モジュール型配管検査ロボットの伸縮機構はバネによって常に配管内壁面を押し付けているため、障害物に遭遇した際や途中で配管の径が小さくなった場合、ロボットの直径を縮めにくい構造となっている。そこで、本研究では劣駆動平行四辺形クローラと呼ばれる形状可変クローラを新たに開発し、3つのモジュールに搭載することでこの問題に対応した。これまで一般的には、このような走破性の問題を解決する方法として、能動的なフリッパーアームや形状可変機能がしばしば採用されてきた [21]。しかし、配管内という空間的に制限されるような環境では、アクチュエーターの追加が小型化を実現する上で大きな障壁となる。そこで本研究では劣駆動機構を用いて移動のための動力を形状可変にも用いることにした。クローラ機構の形状に平行四辺形を用いる理由は、以下の3つが挙げられる。

1. クローラの形状が平行四辺形になるとクローラの本体フレームが持ち上がり、伸縮機構を縮める方向に力を発生させることができる。
2. クローラの形状が平行四辺形に変形してもベルトの周長は一定であるため、ベルト張力を維持するための機構を新たに追加する必要がない [27]。
3. 配管検査ロボットは前進だけでなく回収時(後退時)にも同じ機能を持たせる必要があり、平行四辺形を用いると前後対称の動作を実現できる(図4.15)。この形状可変機能を用いることにより、180°方向転換が難しい環境でも向きを変えることなく後退するだけで逆方向に同じ走破性を実現することができる。

図4.16に劣駆動平行四辺形クローラの単一モジュールの内部構造を示す。まず、モーターはクローラモジュールの外側(横)に固定されており、動力は傘歯車を介して、前部アーム内の差動機構に伝わる。この差動機構により、前部アームは最も先端にあるプーリーを回転させる出力とアーム自体を回転させる出力の2種類に動力を伝達することができる。クローラの形状を平行四辺形にするためには前部アームと後部アームの回転を同期する必要がある。実社会において、前後の回転の同期には蒸気機関車等のクランクバーでも見られるように平行リンク機構を用いることが多い。しかし、通常走行時は前後のアームが水平に一直線に並んでいるため、特異姿勢からアームを回転させなければならず、前後の動作が一意に決まらない [28]。そこで、前部アームの出力はモーターの反対側に取り付けられたタイミングベルトを介して後部アームにも伝わるようになっている。これにより、前後アームの互いの軸

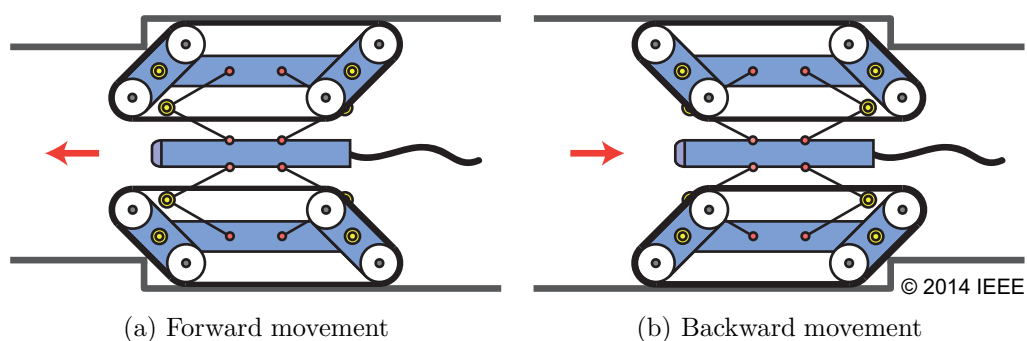


図 4.15: Similar mobility for anterior-posterior symmetric transformation

が同期しているため、それぞれが同じ回転を行うことができる。また、後部アームにはポテンシオメーターが取り付けられるようになっており、回転角度からクローラの変形を検知することができる。

一般的な劣駆動クローラロボットは差動機構の高い出力比を得るために遊星歯車機構等の減速機を用いることが多い [29] [30]。しかし、配管内は空間的に制限されているため、大きな減速機を用いることができない。そこで、本研究では平歯車を2つ用いたシンプルな差動機構を採用する [31]。

図4.17に示すように、通常走行モードと平行四辺形モードの2つを用いて動作原理を説明する。図4.17 (a)の通常走行モードでは、クローラモジュールが伸縮機構によって配管内壁面に押さえつけられているため前後のアームは水平となる。この状態で入力歯車を回転させると動力は最も先端の出力プーリーへ伝わり、クローラは前進することができる。

一方、クローラが障害物等に接触して進行が妨げられた場合、出力プーリーは回転できなくなるため、動力は入力歯車と出力歯車が噛み合ったまま前部アームが持ち上がる方向へと逃げるようにはたらく。その結果、図4.17 (b)のようにクローラの形状は平行四辺形に変化し、全体の高さは35 [mm] から65 [mm] まで大きくなる。また、障害物と接触している状態でもプーリーの力は常に発生しているため、クローラ前部と障害物の接触点には垂直上向きの力がはたらいている。この力はアームの回転を助ける効果があるため、高い減速比を用いなくても前後のアームを持ち上げることができる。つまり、クローラ前部と接触点にはたらく力がアームの回転を助ける方向にモーメントを生じることができれば、低い減速比であっても望みの動作を行うことができる。そのため、これまでの劣駆動クローラロボットに比べると大幅に歯車の数を減らすことが可能になるため、小型軽量化を実現することができる。

屋外環境で用いられるクローラロボットの多くはあらかじめクローラの前部や後部に傾斜角度を持たせることにより障害物適応性を高めているが、配管内では大きさが制限されるため環境に応じて適応性を変える方法が有効である。さらに、このクローラは走行中に外力を受けた場合、アームの回転を用いてその力を吸収することができるため、モーター等への衝撃を和らげる効果がある [29]。

クローラが障害物に衝突すると、アームは進行方向に対して逆回転を始め、形状が平行四辺形に変形する。しかし、ベルトに抵抗がかかり続けた場合、アームは進行方向に対して逆方向に無限回転し続けてしまい、最終的に障害物を乗越えられなくなってしまう。そこで、アームが30°まで傾いたときにそれ以上回転しないようストッパーピンが取り付けられている(図4.18)。この状態でモーターを回し続けるとクローラは平行四辺形を保ったまま前進することができる。

クローラが平行四辺形に変形した状態で伸縮機構が縮んだとき、クローラはロボット中央部に接触してしまい進行を妨げる大きな抵抗が生じてしまう。これを解決するために図4.19に示すようなガイドローラーがロボットの前部と後部の先端に取り付けられている。

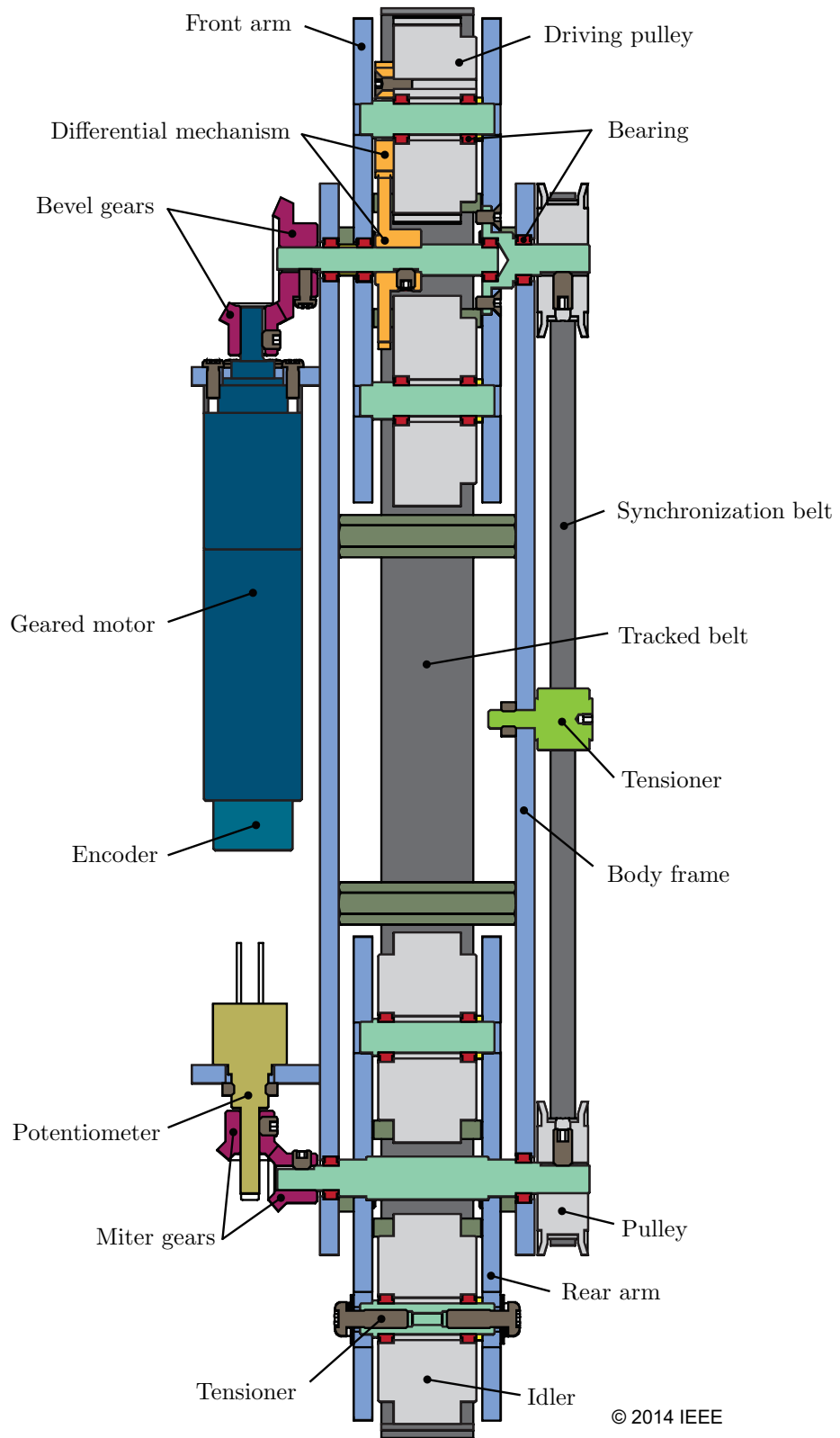


図 4.16: A CAD model of an underactuated parallelogram crawler module

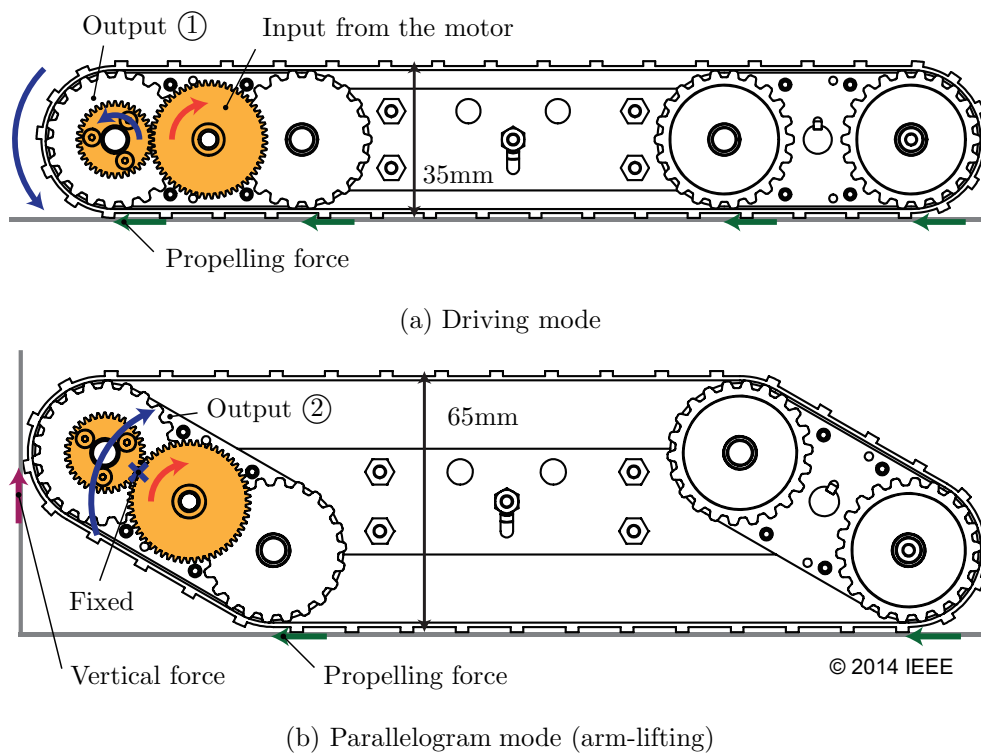


図 4.17: The two modes of the differential mechanism

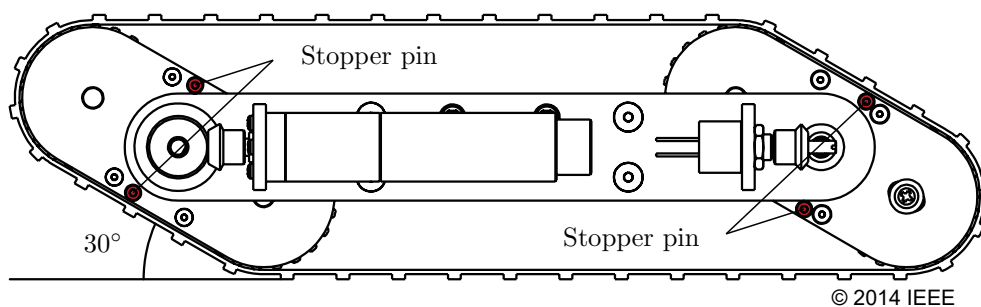


図 4.18: Stopper pins used to limit the rotational angle of the arm

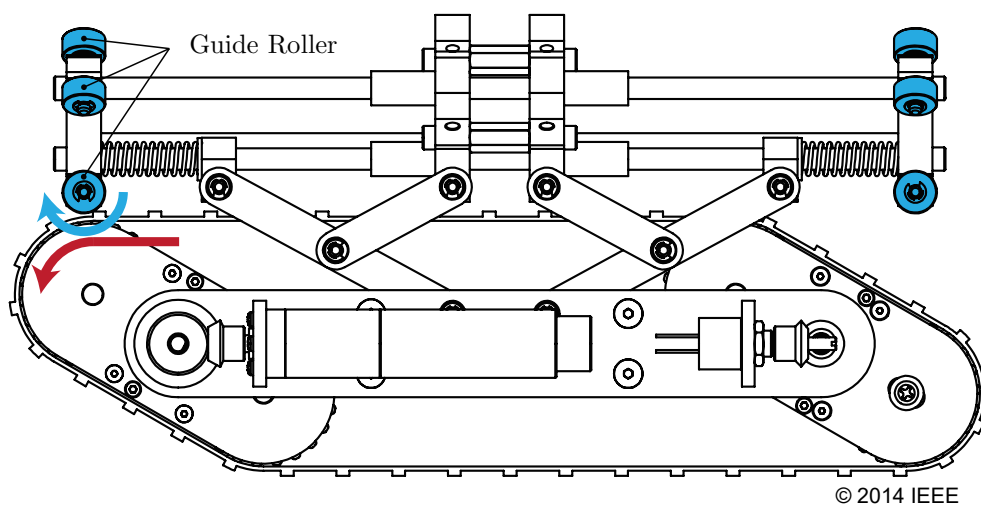


図 4.19: Guide roller to guarantee smooth motion of the belt

4.2.3 静力学解析

劣駆動機構は1つの入力を2つに枝分かれさせて同時に出力するため、その2つの出力の分配比が動作に大きく影響する。この現象はしばしば図 4.20 に示すようなマニホールド管を用いて表される。 τ_{in} , τ_p , τ_f はそれぞれモーターからの入力トルク、クローラを前進させるために必要な先端のプーリーのトルク、アームを回転させるために必要なトルクを表している。通常走行モードでは、先端のプーリーのみが回転し、アームは静止していなければならない。つまり、先端のプーリーに伝わる実際のトルク τ_{out1} は τ_p よりも大きい値である必要があり、同時に、アームに伝わる実際のトルク τ_{out2} は τ_f よりも小さい値でなければならない。同様に、平行四辺形モードでは、先端のプーリーは静止し、アームは回転しなければならない。そのため、先端のプーリーに伝わる実際のトルク τ_{out1} は τ_p よりも小さい値である必要があり、同時に、アームに伝わる実際のトルク τ_{out2} は τ_f よりも大きい値でなければならない。

ここで、先端のプーリーを回転させるためのトルクとアームを回転させるためのトルクの出力比を K とおくと $K = \tau_f / \tau_p$ で表すことができる。通常走行モードでは $\tau_{out2} < \tau_f$ 及び $\tau_{out1} > \tau_p$ が成り立たなくてはならない。一方、平行四辺形モードでは $\tau_{out2} > \tau_f$ 及び $\tau_{out1} < \tau_p$ が成り立たなくてはならない。以上から、実際のクローラの出力比を $K_r = \tau_{out2} / \tau_{out1}$ とおくと、 K_r の条件は

$$\begin{cases} K_r < K & (\text{Normal driving mode}) \\ K_r > K & (\text{Parallelogram mode}) \end{cases} \quad (4.5)$$

で表すことができる。

τ_p 及び τ_f はクローラが遭遇する環境によって変わるため、本項では図 4.21 及び後述の図 4.23 に示す静力学モデルを基にこれらの値を求める [32]。このモデルはクローラを前部アーム、後部アーム、本体フレームの3つの剛体に分けて簡略化されている。力学に関するパラメーターを表 4.3 に、幾何学的なパラメーターを表 4.4 に示す。一般化するためにクローラは γ だけ傾いた配管内壁面上を移動し、前部アームの先端が段差に接触している状態を考える。前後のアームの回転軸はそれぞれの

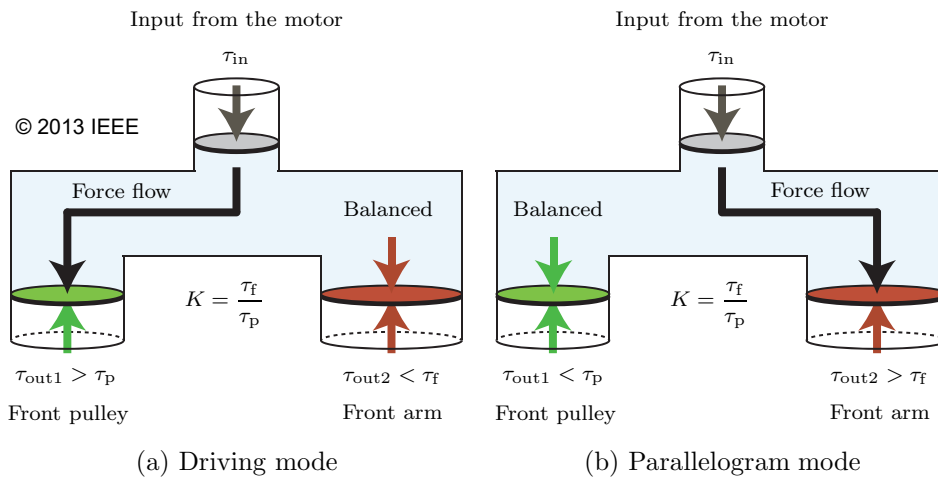


図 4.20: Branch pipe models for torque distribution

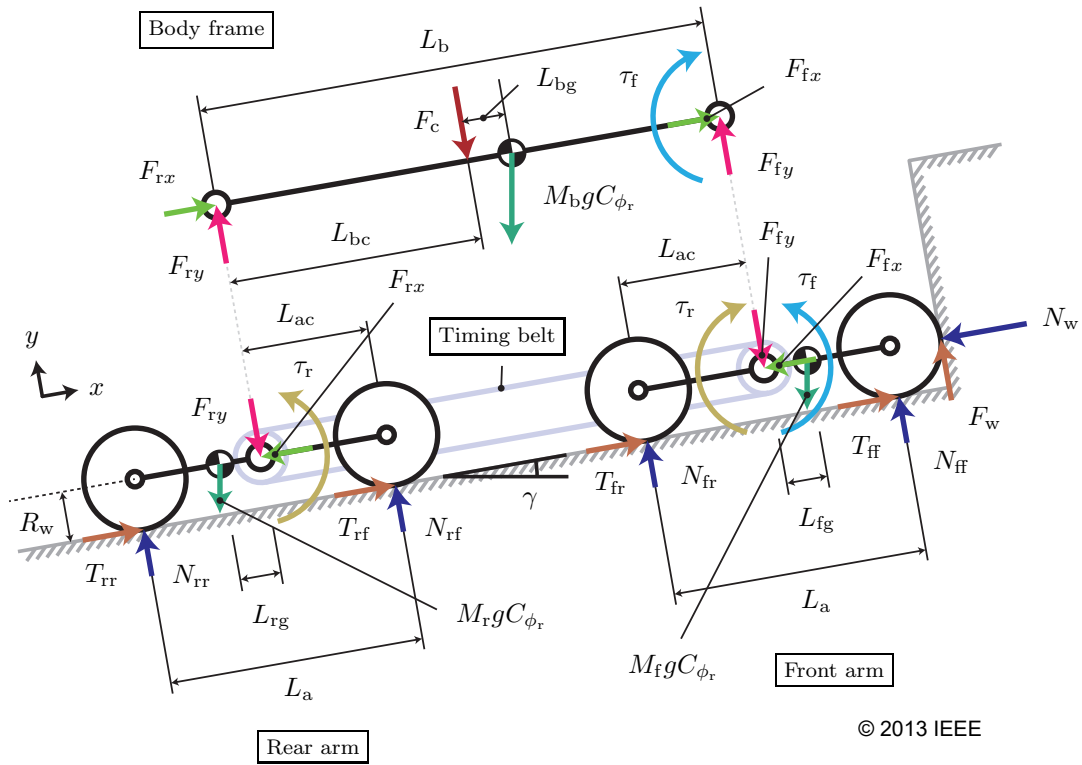


図 4.21: Possible external forces acting on the underactuated parallelogram crawler when it encounters with a step

中心にあり、本体フレームの両端に固定されている。また、これらのアームの軸はタイミングベルトによっても固定されているため、互いの軸に加わるトルクが τ_r として影響を及ぼし合う構造になっている。モーターの入力トルク τ_f は前部アームに加わり、その反作用が本体フレームに加わっている。

それぞれの剛体は質量 M_f, M_b, M_r を持ち、重力の影響を受ける。しかし、3つのクローラモジュールは図4.22のように放射状に配置されているため、ロボットの姿勢によってモジュールに加わる重力の方向が変わる。そのため、配管の半径方向にはたらく重力を $M_f g C_{\phi_r}, M_b g C_{\phi_r}, M_r g C_{\phi_r}$ として計算を行う。

アームを持ち上げるためのトルク

図4.21から、アームを持ち上げるために必要なトルクは3つの剛体(前部アーム、後部アーム、本体フレーム)にはたらく外力とモーメントの釣り合いから求めることができる。前部アームに関して x 軸方向と y 軸方向の力の釣り合い、及びアームの回転軸周りのモーメントの釣り合いを考えると以下の式が得られる。

$$T_{ff} + T_{fr} - F_{fx} - N_w - M_f g C_{\phi_r} S_{\gamma} = 0 \tag{4.6}$$

$$N_{ff} + N_{fr} - F_{fy} + F_w - M_f g C_{\phi_r} C_{\gamma} = 0 \tag{4.7}$$

$$T_{ff} R_w + T_{fr} R_w + N_{ff} L_{ac} - N_{fr} L_{ac} + F_w (L_{ac} + R_w) + \tau_f - \tau_r - M_f g C_{\phi_r} L_{fg} C_{\gamma} = 0 \tag{4.8}$$

表 4.3: Definition of mechanics parameters

Tangential force of the front pulley	T_{ff}
Tangential force of the second pulley	T_{fr}
Tangential force of the third pulley	T_{rf}
Tangential force of the aftermost pulley	T_{rr}
Normal force of the front pulley	N_{ff}
Normal force of the second pulley	N_{fr}
Normal force of the third pulley	N_{rf}
Normal force of the aftermost pulley	N_{rr}
Sum of the normal forces ($N_{ff} + N_{fr} + N_{rf} + N_{rr}$)	N
Vertical force of the front pulley	F_w
Normal force stopping the crawler's motion	N_w
x -axial force interacting between the front arm and body frame	F_{fx}
y -axial force interacting between the front arm and body frame	F_{fy}
x -axial force interacting between the rear arm and body frame	F_{rx}
y -axial force interacting between the rear arm and body frame	F_{ry}
Expanding force of the contractile mechanism	F_c
Initial frictional torque	τ_i
Mass of the front arm	M_f
Mass of the body frame	M_b
Mass of the rear arm	M_r
Total mass of the crawler module ($M_f + M_b + M_r$)	M
Torque of the front driving pulley	τ_p
Torque for lifting the front arm	τ_f
Torque for lifting the rear arm	τ_r
Acceleration of gravity	g
Coefficient of rolling friction	μ_r
Coefficient of sliding friction	μ_s

© 2013 IEEE

表 4.4: Definition of geometric parameters

Inclination angle of the pipe	γ
Angle between gravitational direction and expanding direction of the module	ϕ_r
Sine and cosine function	S and C
Radii of pulleys	R_w
Length of the front and rear arms	L_a
Half length of the front and rear arms	L_{ac}
Distance between COG and center of the front arm	L_{fg}
Distance between COG and center of the rear arm	L_{rg}
Length of the body frame	L_b
Distance between COG and center of the body frame	L_{bg}
Half length of the body frame	L_{bc}

© 2013 IEEE

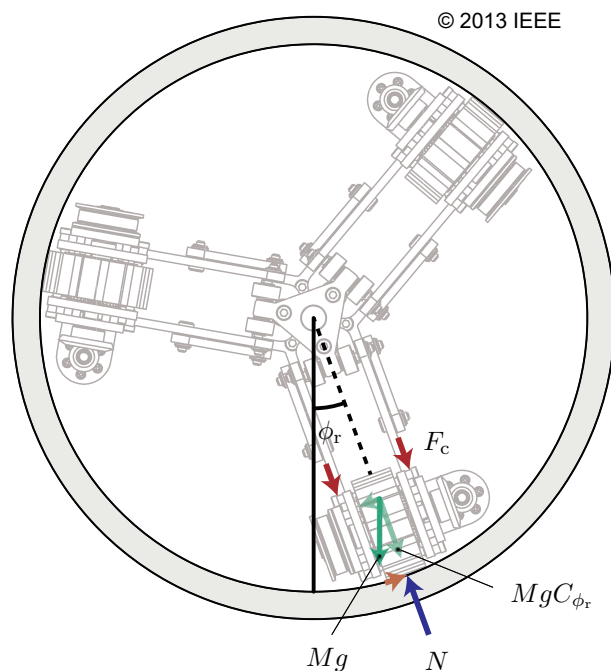


図 4.22: Roll angle of the robot

同様の方法で、本体フレームの釣り合い式

$$F_{fx} + F_{rx} - M_b g C_{\phi_r} S_\gamma = 0 \quad (4.9)$$

$$F_{fy} + F_{ry} - M_b g C_{\phi_r} C_\gamma - F_c = 0 \quad (4.10)$$

$$F_{fy} L_{bc} - F_{ry} L_{bc} - \tau_f - M_b g C_{\phi_r} L_{bg} C_\gamma = 0 \quad (4.11)$$

ならびに、後部アームの釣り合い式

$$T_{rf} + T_{rr} - F_{rx} - M_r g C_{\phi_r} S_\gamma = 0 \quad (4.12)$$

$$N_{rf} + N_{rr} - F_{ry} - M_r g C_{\phi_r} C_\gamma = 0 \quad (4.13)$$

$$T_{rf} R_w + T_{rr} R_w + N_{rf} L_{ac} - N_{rr} L_{ac} + \tau_r + M_r g C_{\phi_r} L_{rg} C_\gamma = 0 \quad (4.14)$$

を得る。これらの式は力の釣り合いに関する基本式であり、クローラが置かれている状況によって加わる外力は変化する。そのため、通常走行モードと平行四辺形モードの2つの状況におけるトルクの条件をそれぞれ求めていく。

通常走行モードにおけるアームを持ち上げるためのトルク

通常走行モードでは、クローラの先端は障害物に接触していない。そのため、 $F_w = N_w = 0$ が成り立つ。また、アームがわずかに浮き上がっていると仮定すると $T_{ff} = T_{rf} = N_{ff} = N_{rf} = 0$ が成り立つ。これらを上記の基本式に代入すると、前部アームに関する釣り合いの式は

$$T_{fr} - F_{fx} - M_f g C_{\phi_r} S_\gamma = 0 \quad (4.15)$$

$$N_{fr} - F_{fy} - M_f g C_{\phi_r} C_\gamma = 0 \quad (4.16)$$

$$T_{fr} R_w - N_{fr} L_{ac} + \tau_f - \tau_r - M_f g C_{\phi_r} L_{fg} C_\gamma = 0 \quad (4.17)$$

となる。同様に、後部アームについても上記の式を利用すると、

$$T_{rr} - F_{rx} - M_r g C_{\phi_r} S_\gamma = 0 \quad (4.18)$$

$$N_{rr} - F_{ry} - M_r g C_{\phi_r} C_\gamma = 0 \quad (4.19)$$

$$T_{rr} R_w - N_{rr} L_{ac} + \tau_r + M_r g C_{\phi_r} L_{rg} C_\gamma = 0 \quad (4.20)$$

で表すことができる。本体フレームに関する釣り合いの式は式(4.9), (4.10), (4.11)と変わらない。式(4.9), (4.15), (4.18)から、クローラの接線方向の力の和は

$$T_{fr} + T_{rr} = M g C_{\phi_r} S_\gamma \quad (4.21)$$

で表すことができる。式(4.10), (4.16), (4.19)から垂直抗力の和は

$$N_{fr} + N_{rr} = M g C_{\phi_r} C_\gamma + F_c \quad (4.22)$$

で表すことができる。さらに、式(4.21)と(4.22)を式(4.17)と(4.20)の和に代入すると、通常走行モードにおけるアームを持ち上げるためのトルク τ_f が以下のように求められる。

$$\tau_f = L_{ac}(M g C_{\phi_r} C_\gamma + F_c) - M g C_{\phi_r} R_w S_\gamma + (M_f L_{fg} - M_r L_{rg}) g C_{\phi_r} C_\gamma + \tau_i. \quad (4.23)$$

式中の最初の項は重力と伸縮機構の力に依存し、アームを持ち上げるためにはこれらの力に打ち勝たなければならないことを意味している。式中の2番目の項は配管内壁面の傾き角 γ に依存し、この角度が大きくなればなるほどアームを持ち上げるために必要なトルクは小さくなる。そのため、符号は負となっている。3番目の項は前後のアームの重心位置によって依存し、それぞれの重心位置がアームの回転軸から遠ければ遠いほど、その影響を受けやすくなる。なお、実際のロボットには軸とベアリング、ベルトの張力等の機械的な摩擦力や慣性等が複雑に影響を及ぼしあうことで発生する初期抵抗が存在する。そのため、ここではこれらの初期抵抗をまとめて τ_i として表している。

平行四辺形モードにおけるアームを持ち上げるためのトルク

平行四辺形モードでは、通常走行モードと同様にわずかにアームが持ち上がっていると仮定すると $T_{ff} = T_{rf} = N_{ff} = N_{rf} = 0$ が成り立つ。しかし、クローラの先端は障害物に接触しているため、 $F_w \neq N_w \neq 0$ となる。その結果、前部アームに関する力とモーメントの釣り合いの式は

$$T_{fr} - F_{fx} - N_w - M_f g C_{\phi_r} S_\gamma = 0 \quad (4.24)$$

$$N_{fr} - F_{fy} - F_w - M_f g C_{\phi_r} C_\gamma = 0 \quad (4.25)$$

$$T_{fr} R_w - N_{fr} L_{ac} + F_w (L_{ac} + R_w) + \tau_f - \tau_r - M_f g C_{\phi_r} L_{fg} C_\gamma = 0 \quad (4.26)$$

となる。後部アームに関する釣り合いの式は通常走行モードと同様に式(4.18), (4.19), (4.20)と同じになり、本体フレームに関する釣り合いの式は式(4.9), (4.10), (4.11)と同じになる。式(4.9), (4.18), (4.24)から、クローラの接線方向の力の和は

$$T_{fr} + T_{rr} = M g C_{\phi_r} S_\gamma + N_w \quad (4.27)$$

で表すことができる。式(4.10), (4.19), (4.25)から、クローラにはたらく垂直抗力の和は

$$N_{fr} + N_{rr} = M g C_{\phi_r} C_\gamma + F_c - F_w \quad (4.28)$$

で表すことができる。クローラが障害物に接触してそれ以上前に進めない状態になると、ロボットは滑り始める。このときクローラには滑り摩擦が発生しているため、動摩擦係数 μ_s を用いて以下の関係を導くことができる。

$$T_{fr} = \mu_s N_{fr} \quad (4.29)$$

$$T_{rr} = \mu_s N_{rr} \quad (4.30)$$

$$F_w = \mu_s N_w \quad (4.31)$$

式(4.27), (4.28), (4.31)を式(4.20)と(4.26)の和に代入すると、 τ_f は

$$\begin{aligned} \tau_f = & L_{ac} (M g C_{\phi_r} C_\gamma + F_c) - M g C_{\phi_r} R_w S_\gamma \\ & + (M_f L_{fg} - M_r L_{rg}) g C_{\phi_r} C_\gamma - N_w \{ \mu_s L_a + R_w (1 + \mu_s) \} + \tau_i \end{aligned} \quad (4.32)$$

のように求めることができる。このとき、クローラの進行を妨げる垂直抗力 N_w は以下の式で与えられる。

$$N_w = \frac{\mu_s(MgC_{\phi_r}C_\gamma + F_c) - MgC_{\phi_r}S_\gamma}{\mu_s^2 + 1} \quad (4.33)$$

式(4.32)の最初の項は重力と伸縮機構の力に依存し、アームを持ち上げるためにはこれらの力に打ち勝たなければならないことを意味している。式中の2番目の項は式(4.23)でも述べたように、配管内壁面の傾き角 γ に依存し、この角度が大きくなればなるほどアームを持ち上げるために必要なトルクは小さくなる。3番目の項も式(4.23)と同様に前後のアームの重心位置によって依存し、それぞれの重心位置がアームの回転軸から遠ければ遠いほど、その影響を受けやすくなる。式中の4番目の項はクローラと障害物の間にはたらく上向きの力 F_w に依存し、この力はアームの回転を助ける方向にはたらく。また、ここでも初期抵抗をまとめて τ_i として表している。

プーリーを回転させるためのトルク

最も先端のプーリーを回転させるためのトルク τ_p は前部アームを回転させるためのトルク τ_f が平歯車を介して発生する。このトルクは図4.23に示すように、クローラのベルトに沿ってはたらく力に釣り合うものとして考えることができる。ここでも初期抵抗 τ_i を考慮すると τ_p は以下の基本式で与えられる。

$$\tau_p = R_w(T_{ff} + T_{fr} + T_{rf} + T_{rr} + F_w) + \tau_i \quad (4.34)$$

91頁の通常走行モードにおけるアームを持ち上げるためのトルクと92頁の平行四辺形モードにおけるアームを持ち上げるためのトルクで述べたように、ここでも先端のプーリーを回転させるためのトルク τ_p は通常走行モードと平行四辺形モードで異なる。そのため、これらをそれぞれのモードで求める。

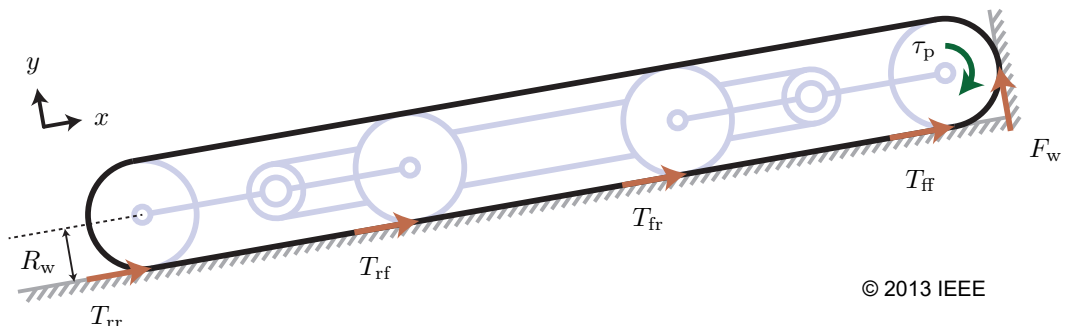


図 4.23: Torque of the front pulley and tangential forces acting on the track belt when it encounters with a step

通常走行モードにおけるプーリーを回転させるためのトルク

通常走行モードではクローラの先端が障害物に接触していないため $F_w = N_w = 0$ が成り立つ。よって、 τ_p は式 (4.34) から F_w を削除することで求められる。

$$\tau_p = R_w(T_{ff} + T_{fr} + T_{rf} + T_{rr}) + \tau_i \quad (4.35)$$

式 (4.6), (4.9), (4.12) の和から N_w を消去し、式 (4.35) に代入すると、 τ_p は以下の式で求められる。

$$\tau_p = R_w Mg C_{\phi_r} S_\gamma + \tau_i \quad (4.36)$$

平行四辺形モードにおけるプーリーを回転させるためのトルク

一方、平行四辺形モードではクローラの先端が障害物に接触し、なおかつ前後のアームが持ち上がった状態になっている。よって、 $F_w \neq N_w \neq 0$ となり、 $T_{ff} = T_{rf} = 0$ が成り立つ。その結果、 τ_p は以下の式で与えられる。

$$\tau_p = R_w(T_{fr} + T_{rr} + F_w) + \tau_i \quad (4.37)$$

式 (4.27) 及び (4.31) を式 (4.37) に代入すると、平行四辺形モードにおけるプーリーを回転させるためトルク τ_p は

$$\tau_p = R_w \{ Mg C_{\phi_r} S_\gamma + (\mu_s + 1) N_w \} + \tau_i \quad (4.38)$$

で表すことができる。 N_w の値は式 (4.33) をそのまま使用することができる。

4.2.4 歯車の歯数比の設計

静力学解析によって求めた τ_p , τ_f , 及びこれらの出力比 K を通常走行モードにおける式 (4.23) と (4.36), 平行四辺形モードにおける式 (4.32) と (4.38) から求めていく。解析に用いた各剛体の質量や寸法を表4.5に示す。クローラの後部アーム及び本体フレームは前後対称の構造となっているため、 $L_{bg} = L_{rg} = 0$ としている。また、前部アームについても重心位置は先端プーリーの歯車のみによって移動し、この影響は小さいため、 $L_{fg} = 0$ としている。滑り摩擦係数 μ_s はクローラに使用している一般的なポリウレタンベルトと配管に使用している塩化ビニルの値 (0.4) を用いる。初期抵抗 τ_i の値は無負荷の状態でクローラを回転させたときの値を使用した。この値は無負荷回転時の電流値 i , トルク定数 K_τ , 減速比 K_{ratio} を用いて以下の式で求められる。

$$\tau_i = K_{ratio} K_\tau i \quad (4.39)$$

電流値は実測値である $i = 0.1$ [A], トルク定数はモーターの仕様書から $K_\tau = 8.11$ [Nmm/A], 減速比は実際の値 $K_{ratio} = 84$ を用いた。これらを計算すると、 $\tau_i = 68.124$ [Nmm] が得られる。

表 4.5: Setting of parameters in the analysis

M_f [kg]	0.13
M_b [kg]	0.20
M_r [kg]	0.12
g [m/s^2]	9.8
R_w [mm]	20
L_a [mm]	46
L_b [mm]	150

伸縮機構の押付力 F_s による影響

クローラが配管上部壁面に位置する状態では、伸縮機構は重力に逆らいながらより大きな力で押し付けなければならない。そのため、ロボットに求められる伸縮機構の壁面押付力 F_s の影響を $\gamma = 0$, $\phi_r = 180^\circ$ の条件で求める。図 4.24 (a) は通常走行モードにおける F_s の影響を、図 4.24 (b) は平行四辺形モードにおける F_s の影響を示している。計算上では F_s が 4.4 [N] 以下になると、それぞれのトルクの値は τ_f 以下となる。これはクローラが配管内壁面から離れることを意味しており、言い換えれば F_s は 4.4 [N] 以上でなければならないことを意味している。

伸縮機構の壁面押付力はバネの力 S_p に影響し、図 4.25 のように表すことができる。このときの壁面押付力は文献 [20] を参考にすると、正接関数を用いて以下の式で求めることができる。

$$F_s = 2S_p \tan \psi \tag{4.40}$$

実際のバネの自然長は 55 [mm] となっており、ロボットが直管内に入ると 53 [mm] まで縮む。よってこの状態のバネの力は $S_p = k(55 - 53)$ で与えられる (k はバネ剛性)。直管内の状態では $\psi = 70^\circ$ となり、 k の値には 0.5 [N/mm] を用いた。このとき、 F_s の値は約 5.5 [N] となり、4.4 [N] 以上の条件を満たすことになる。

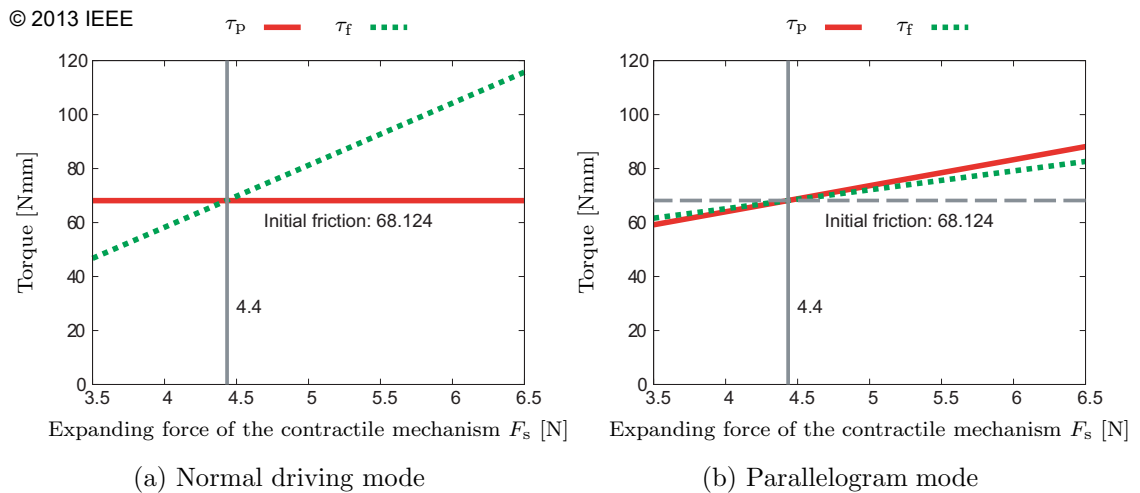


図 4.24: Effects of the expanding force F_s , where $\mu_s = 0.4$, $\gamma = 0$, $\phi_r = 180^\circ$

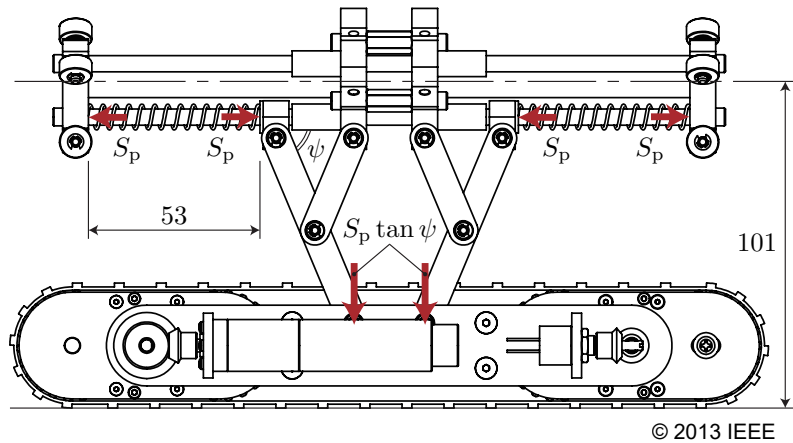


図 4.25: Expanding force of the contractile mechanism

ロボットの Roll 角 ϕ_r による影響

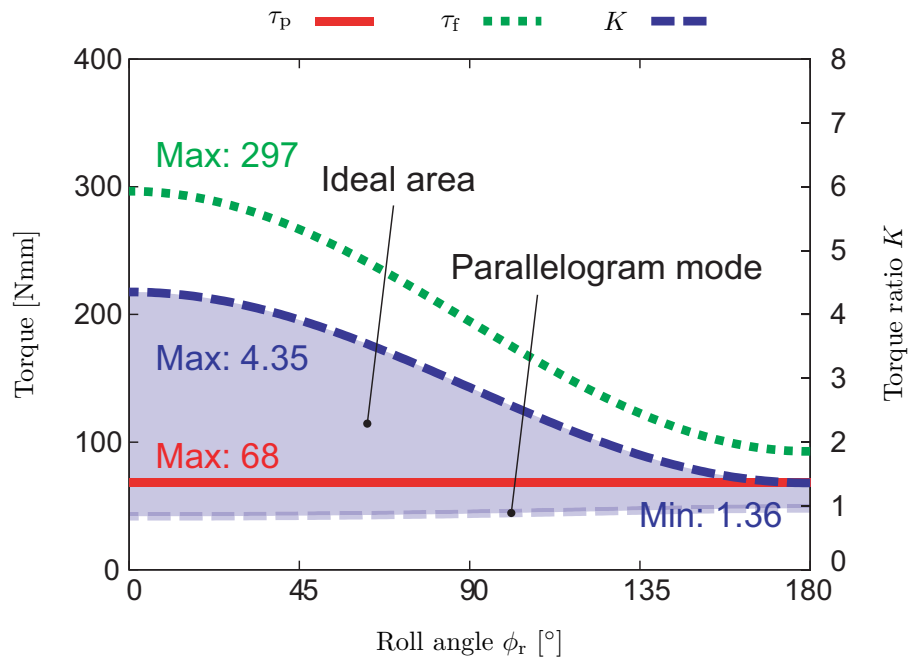
図 4.26 (a) は通常走行モードにおいてロボットの Roll 角 ϕ_r がプーリーの回転トルク τ_p , アームの回転トルク τ_f , 出力比 K に与える影響を表している. F_s の値は前述の値 5.5 [N] を使用している. 同様に, 図 4.26 (b) は平行四辺形モードにおいてロボットの Roll 角 ϕ_r がプーリーの回転トルク τ_p , アームの回転トルク τ_f , 出力比 K に与える影響を表している. 理想的な動作をロボットにさせるためには, 実際の出力比 K_r は式 (4.5) より, 通常走行モードの K より小さく平行四辺形モードの K より大きくなければならない. これら 2つのグラフをまとめると, すべての Roll 角 ϕ_r に対応するためには出力比は $0.96 < K_r < 1.36$ の範囲にあることが望ましい. なお, $K_r < 0.96$ のときは, ロボットが障害物に接触してもアームを持ち上げられずその場で滑ってしまうことを意味し, $1.36 < K_r$ のときは, 通常走行モードであってもアームが持ち上がってしまうことを意味している.

初期抵抗 τ_i による影響

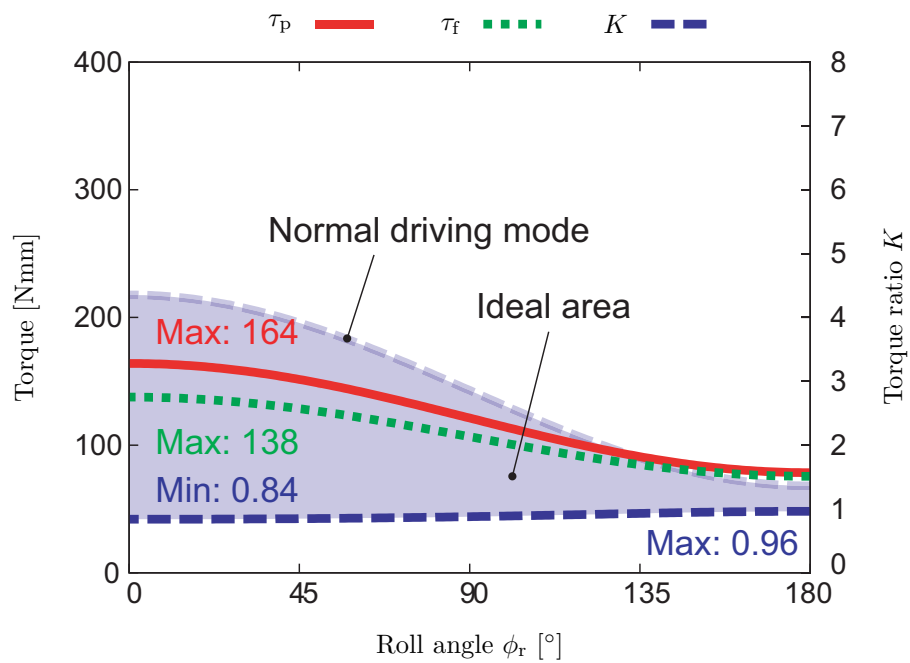
図 4.27 (a) は通常走行モードにおいて初期抵抗 τ_i がプーリーの回転トルク τ_p , アームの回転トルク τ_f , 出力比 K に与える影響を表している. 図 4.26 より, 最も厳しい条件 (K_r の取るべき範囲が狭くなる条件) は $\phi_r = 180^\circ$ であるため, この値を使用した. 図 4.27 (b) は平行四辺形モードにおいて初期抵抗 τ_i がプーリーの回転トルク τ_p , アームの回転トルク τ_f , 出力比 K に与える影響を表している. これらの図から, K_r の取るべき範囲を大きくするためには初期抵抗 τ_i を小さく抑えれば良いことがわかる. 一方, 初期抵抗が大きくなると, K の値はどちらも 1 に限りなく近づくため, K_r の取るべき範囲は非常に狭くなる. これは, 初期抵抗が大きくなるような構造を用いると, 出力比を 1 にせざるを得なくなり, 減速比の調整が難しくなることを意味している.

配管の傾き角 γ による影響

図 4.28 (a) は通常走行モードにおいて配管の傾き角 γ がプーリーの回転トルク τ_p , アームの回転トルク τ_f , 出力比 K に与える影響を表している. 通常走行モードでは,

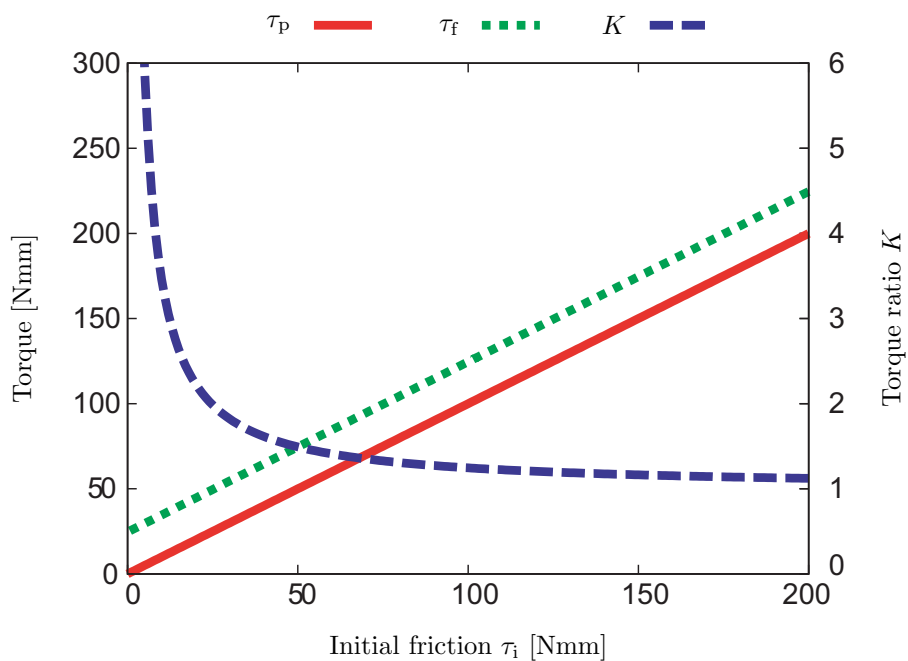


(a) Normal driving mode

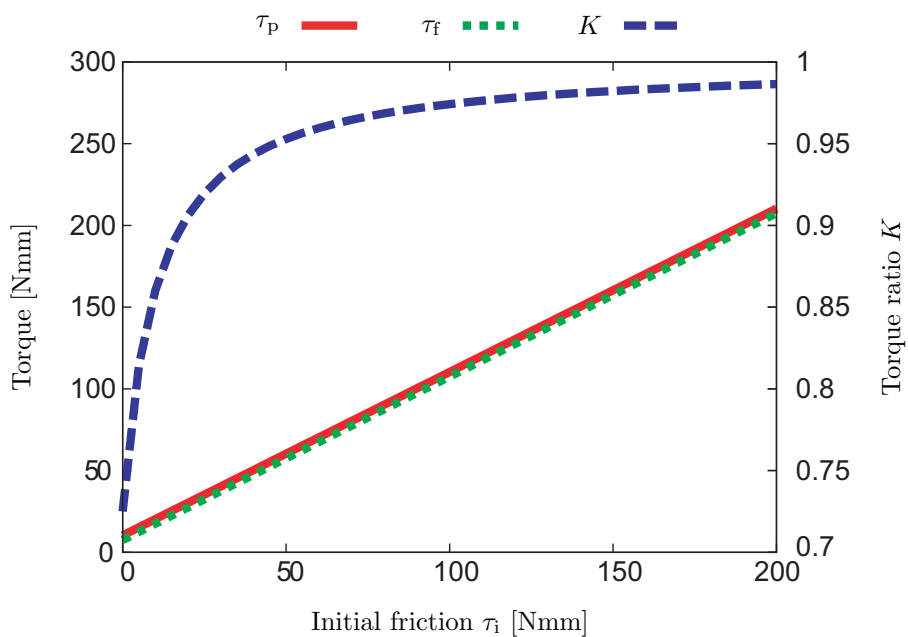


(b) Parallelogram mode

図 4.26: Effect of the roll angle ϕ_r , where $\mu_s = 0.4$, $F_s = 5.5$ [N], $\gamma = 0$



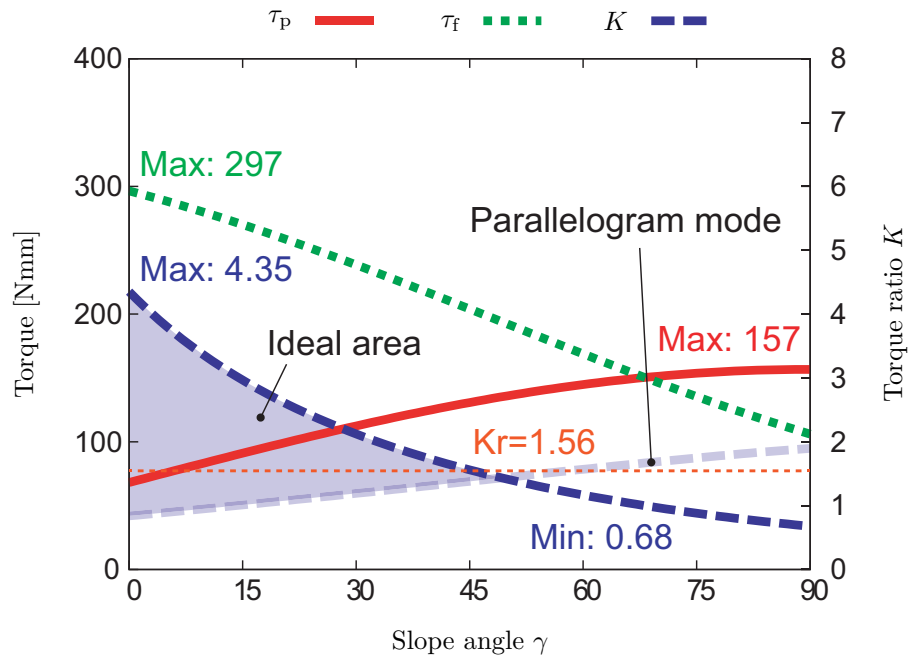
(a) Normal driving mode



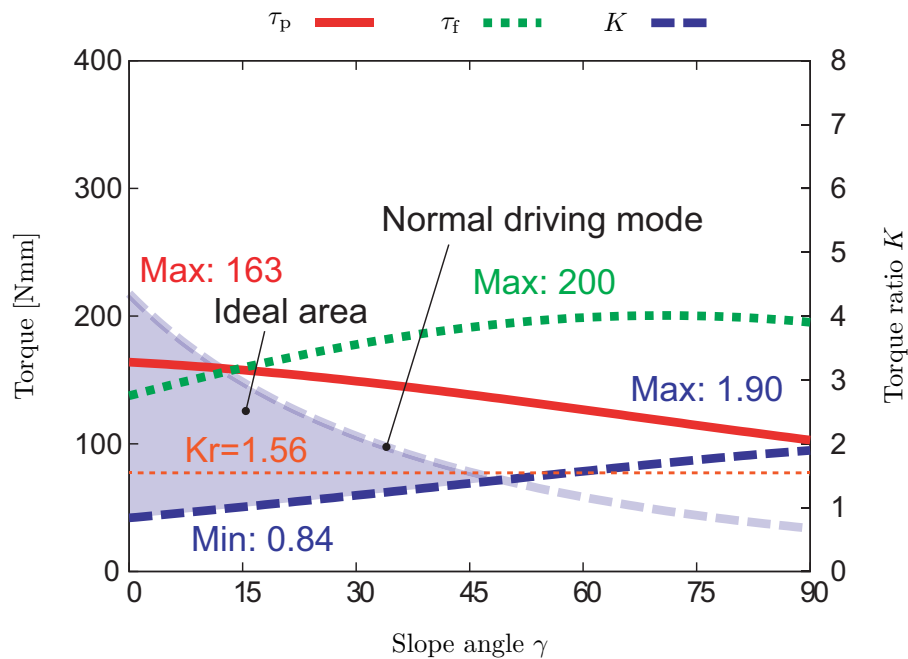
(b) Parallelogram mode

図 4.27: Effect of the initial friction τ_i , where $\mu_s = 0.4$, $F_s = 5.5$ [N], $\gamma = 0$, $\phi_r = 180^\circ$

プーリーのトルク τ_p が $\gamma = 90^\circ$ のとき最大となり、これは配管を垂直に立てた状態に相当する。アームを持ち上げるためのトルク τ_f は γ の値に反比例する。これは角度 γ が増えると、重力がアームの回転を助けることを意味している。図 4.28 (b) は平行四辺形モードにおいて配管の傾き角 γ がプーリーの回転トルク τ_p 、アームの回転トルク τ_f 、出力比 K に与える影響を表している。式 (4.32) は $\sin \gamma$ と $\cos \gamma$ の両方を含んだ関数になっているため、 τ_f は $\gamma = 60^\circ$ 付近で最大値をとる。2 つの K の曲線はおおよそ $\gamma = 47^\circ$ 付近で交わっている。これは γ が 47° を超えた場合、通常走



(a) Normal driving mode



(b) Parallelogram mode

図 4.28: Effect of the slope angle γ , where $\mu_s = 0.4$, $F_s = 5.5$ [N], $\phi_r = 0$

行モードでもアームが持ち上がることを意味している。しかし、実際にはアームが持ち上がると、伸縮機構も縮むため、 F_c の値が大きくなり、結果的にアームの回転は止まり、移動を再開することになる。

K_r の理想の範囲は γ の値が増えるにつれて徐々に狭くなる。できるだけあらゆる γ の値に対応するため、今回は出力比を $K = 1.56$ に設定した。これは歯車の歯数比が $56 : 36$ の時のときの値である。出力比 $K = 1.56$ は図4.26より、 $\phi = 180^\circ$ の時の K を超えており、クローラが配管上部に押し付けられている状態では、アームが持ち上がる可能性があることを意味している。

滑り摩擦係数 μ_s による影響

滑り摩擦係数 μ_s は通常走行モードでは考慮していない。よって、ここでは平行四辺形モードのみについて述べる。図4.29は平行四辺形モードにおいて滑り摩擦係数 μ_s がプーリーの回転トルク τ_p 、アームの回転トルク τ_f 、出力比 K に与える影響を表している。図より、アームを持ち上げるためのトルク τ_f は滑り摩擦係数 μ_s が0.66付近を超えると負の値になっている。これは滑り摩擦係数 μ_s が十分であれば、アームの回転のためのトルクが必要でなくなることを意味し、クローラはプーリーの回転のみで変形できることを意味している。また、滑り摩擦係数 μ_s が0.23以下になると、 K_r は1.56よりも大きな値である必要があり、この状態ではアームが持ち上がらずにクローラが滑ってしまうことを意味している。滑り摩擦係数 μ_s が大きければ大きいほど、 K_r の理想の範囲は大きくなる。

表4.2に示したように、モーターの定格トルクは332 [Nmm]であり、図4.26や図4.28のアームの回転トルク τ_f の最大値297 [Nmm]を満たしている。しかし、安全率を考慮し、今回はモーターのトルクを傘歯車によって2倍に増幅している。

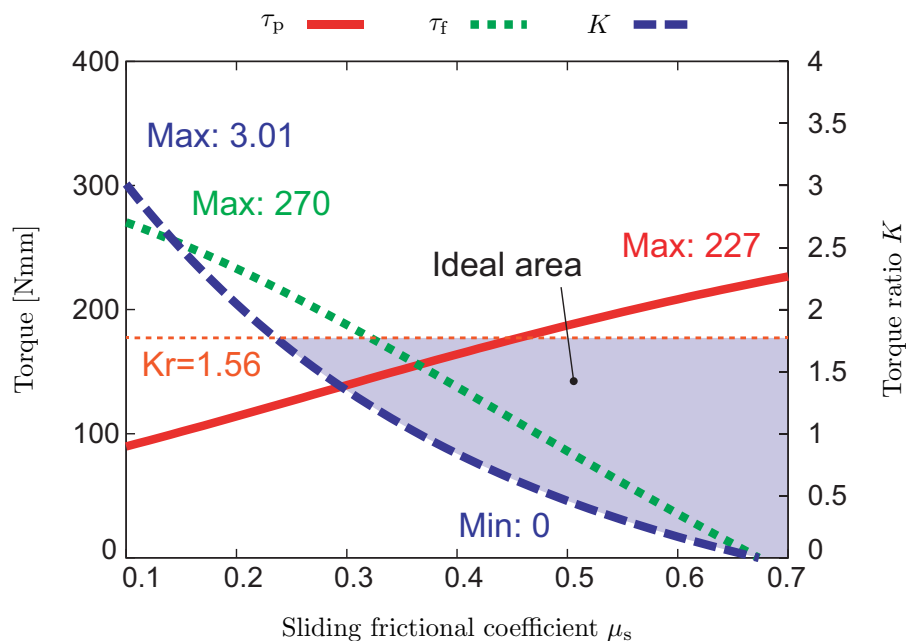


図 4.29: Effect of the sliding frictional coefficient μ_s in the parallelogram mode, where $F_s = 5.5$ [N], $\phi_r = 0$, $\gamma = 0$

4.2.5 操作用コントローラー

3つのモジュールを制御するためのコントローラーを図4.30に、またその構成を図4.31に示す。螺旋駆動型配管検査ロボット用のコントローラーと同様に、ジョイスティックは縦横に倒した度合いに応じて電圧値を取得できるため、これによりロボットの進行方向に対する旋回の向きを決定する。マイクロコントローラーにはMicrochip社製のPIC16F887を、モータードライバー(Hブリッジ)には東芝製のTA8429HQを用いた。本研究では、左ジョイスティックを旋回方向の決定に用い、右ジョイスティックを前進と後進(3つのモジュールがすべて同じ速度)に用いた。今回、右ジョイスティックの左右方向の情報は使用していない。

ここで、ジョイスティックと各モーターの速度の対応付けを図4.32を用いて解説する。ジョイスティックの縦方向はロボットのX軸方向に、横方向はY軸方向にそ

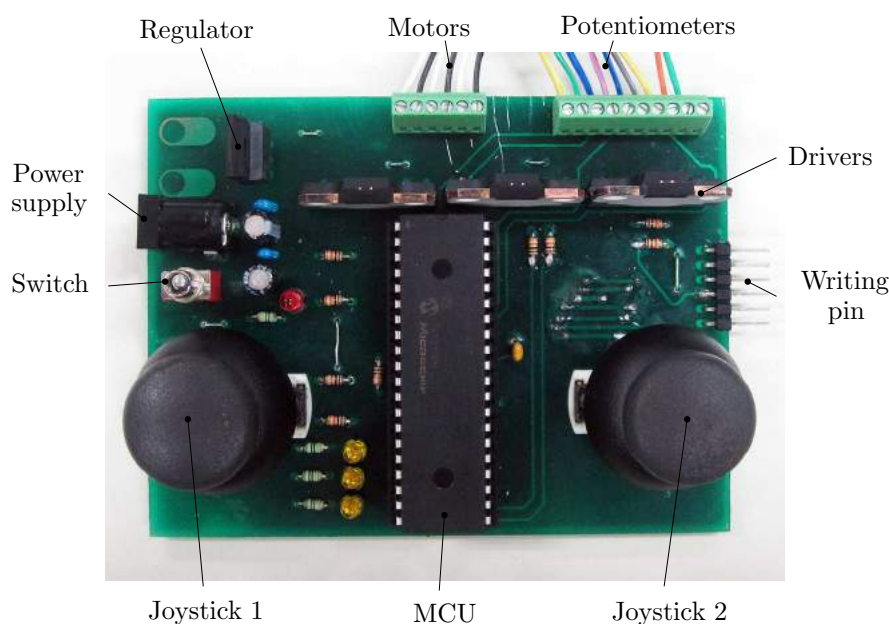


図 4.30: Overview of a controller for the three modular pipe inspection robot

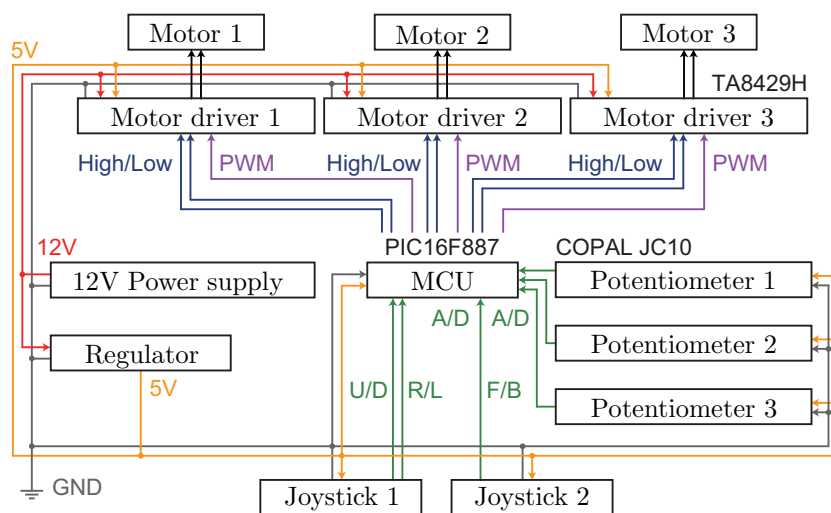


図 4.31: Configuration of a controller for the three modular pipe inspection robot

それぞれ対応している。ロボットの進行方向 (Z 軸) に対する方向転換の角度を θ_{target} 、ジョイスティックから得られる縦軸と横軸の値をそれぞれ IN_X , IN_Y とする。実際の角速度である ω_x と ω_y のベクトルはジョイスティックの方向をちょうど 90° 回転させた向きに一致するため、それぞれの目標角速度を以下のように変換行列を用いて表す。

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} IN_x \\ IN_y \end{bmatrix} \tag{4.41}$$

ここで得た値を式 (3.96) に代入すると 3 つのモーターの速度比を求めることができる。 θ_{target} は $\tan^{-1}(IN_Y/IN_X)$ により求めることができ、これと 3 つのモーターの速度比をグラフに表すと図 4.33 のようになる。なお、ここでは速度比の最大値が 100 となるように式 (3.96) のそれぞれの値に 50 を掛けている。また、今回は $\theta_a = 0$ とし、ここで得られた速度比に合わせて PWM のデューティ比を変更した。

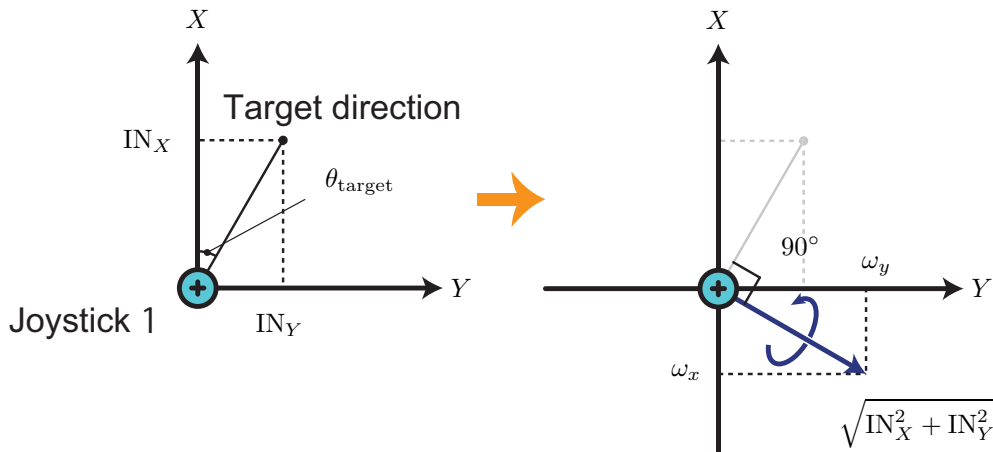


図 4.32: Setting of the joystick

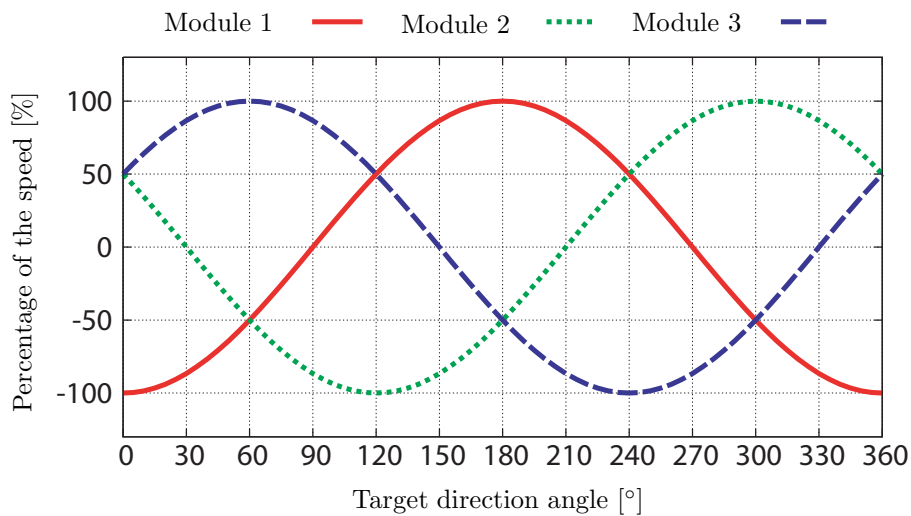


図 4.33: Speed ratio between each module

4.2.6 段差走行実験

劣駆動平行四辺形クローラ機構の走破性を検証するため、インクリーザーと呼ばれる段差管(図4.34(a))と部分的な配管の窪みをゴムで再現した配管(図4.34(b))で実験を行った。インクリーザーには塩化ビニル管・継手協会により規格化されている「AS-12」を使用した。ゴムの窪みは最も厚いところでおよそ35 [mm]の段差となっている。

段差管での実験結果を図4.35に示す。本実験では、すべてのモジュールの速度が同じになるよう電源と3つのモーターを並列につないだ。実験により、ロボットが段差に接触するとクローラの形状が平行四辺形へ変化し、直径の小さな配管へと進んでいくことが確認できた。

次に、部分的な窪みに対する実験結果を図4.36に示す。ロボットが窪みに差し掛

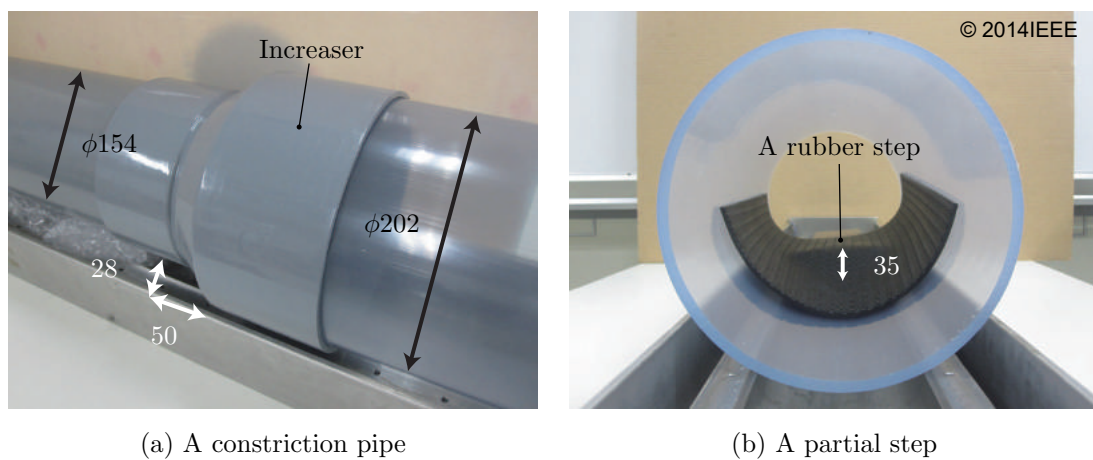


図 4.34: Experimental setup of stepped pipes

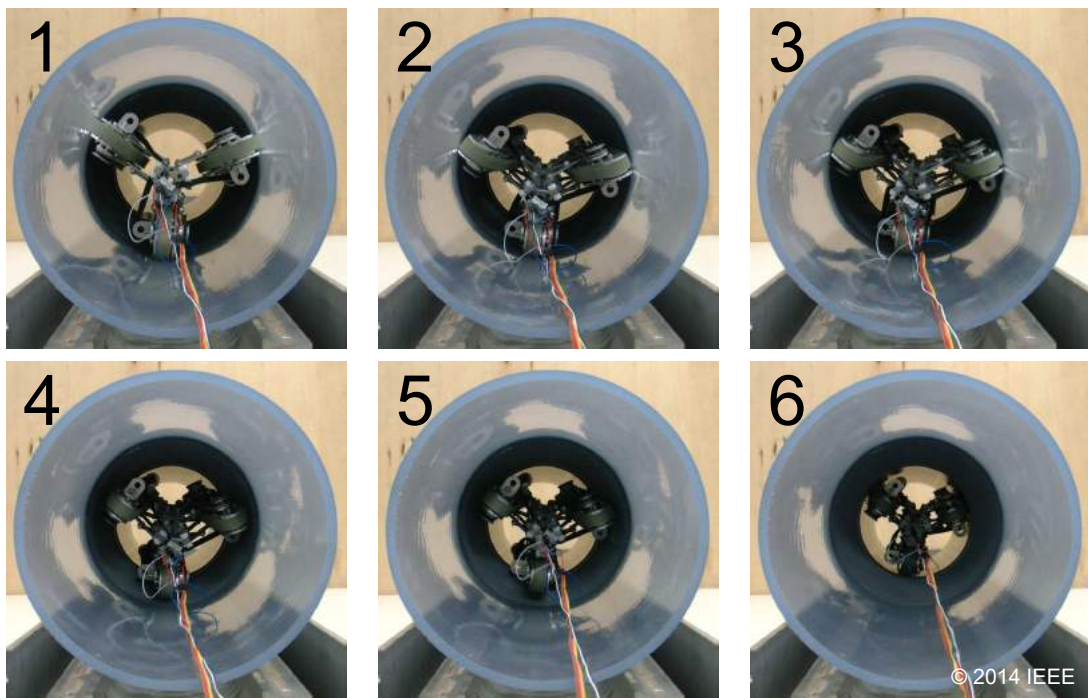


図 4.35: Experimental sequence in the constriction pipes

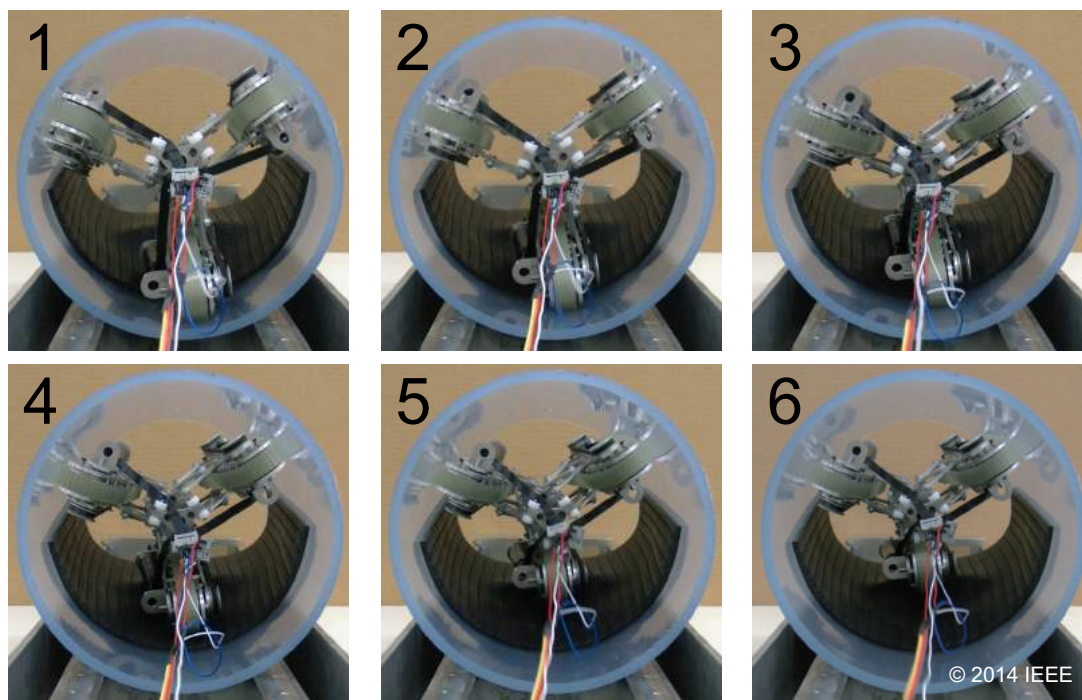


図 4.36: Experimental sequence in a straight pipe with a partial step

かると、まず窪みに接触しているクローラが変形を始めるが、これにより他の2つのクローラの移動が妨げられ、結果としてこれら2つのクローラも変形し始める。そのため、3つのクローラをすべて同じ速度で制御し続けても障害物に接触していないモジュールは受動的に力のバランスを整えようとするため、そのまま前屈みのような姿勢にならずに障害物を走行することができた。

4.3 まとめ

本章では、螺旋駆動型配管検査ロボット及び3モジュール型配管検査ロボットの設計について解説した。螺旋駆動型配管検査ロボットの設計では、ロボットの基本的な構造や仕様について述べた後、1つのモーターで3次元的に屈曲動作を行うための経路選択機構及び3つの動作モードを示した。また、第3章で求めた伸縮機構の空間的な制約に基づき、腕のバネ剛性の設計手法について述べた。

3モジュール型配管検査ロボットの設計では、ロボットの基本的な構造や仕様について述べた後、配管内の障害物に適応しやすくするための劣駆動平行四辺形クローラとその中に含まれる歯車の歯数比の設計手法について静力学を基に解説した。最後に、劣駆動平行四辺形クローラの動作確認を行うため、段差走行実験の結果を示した。

第 5 章

曲管内走行実験

本章では，開発した螺旋駆動型配管検査ロボットと 3 モジュール型配管検査ロボットの曲管内走行実験について述べる．

5.1 螺旋駆動型配管検査ロボットの実験

5.1.1 実験環境

配管には図 5.1 に示すようなアクリル製の直管と塩化ビニル製の曲管 (規格 : JIS K 6739) を使用した．直管の寸法は内径 125 [mm]，長さ 1000 [mm] となっており，曲管も同じく内径 125 [mm] となっている．曲管の曲率半径 (管径の中心から曲率半径の中心までの距離) は 140 [mm] となっている．これらはすべて解析の値と一致する．



(a) Straight pipe



(b) Bent pipe

図 5.1: Pipes for the experiment of the screw-driving pipe inspection robot

5.1.2 基本動作確認実験

まず初めに，螺旋駆動型配管検査ロボットの基本的な動作確認実験を行った．伸縮機構のバネ剛性は $k = 0.3$ [N/mm] を，腕の自然長は 67 [mm] とした．操作用コ

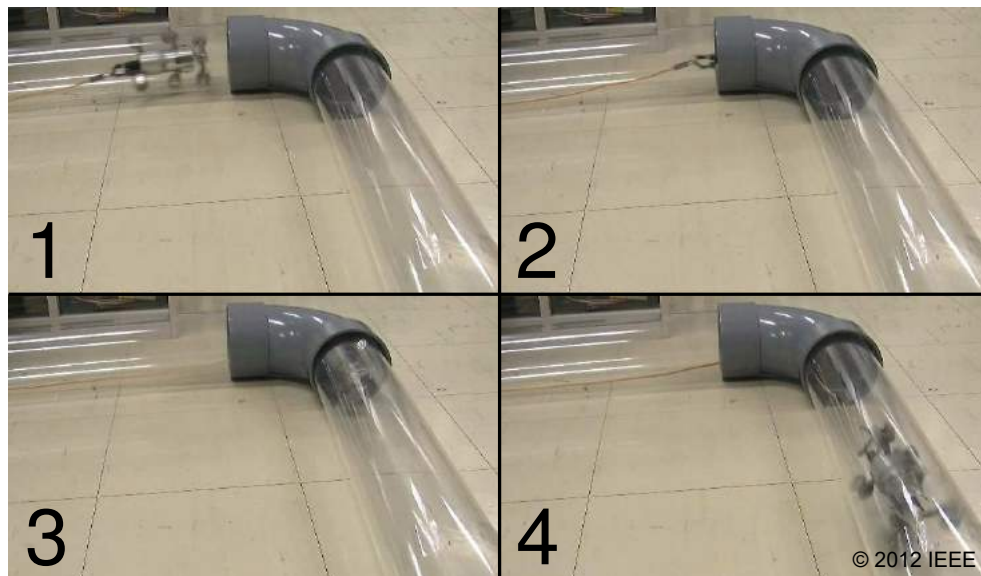


図 5.2: Experimental result at a bent pipe

ントローラーは図 4.10 で示したものを用了. 図 5.2 に曲管内における実験結果を示す. 実験からロボットが曲管内を移動できていることがわかる. また, 走破性には問題ないが, ロボットが曲管を出る際にしばしば受動的にロボットが屈曲してしまい, コントローラーを用いて手動で体勢を元に戻す操作が必要になった.

5.1.3 モータートルクの計測実験

次に前章のバネ剛性とモータートルクの関係を検証するため, トルクの計測実験を行った.

実験装置

図 5.3 に実験装置を示す. 曲管内走行のみであれば, 螺旋駆動型配管検査ロボットは前部ユニットの回転の 1 自由度のみで移動できるため, 今回は経路選択機構を取り除いた状態で実験を行った. また, ロボットの慣性の影響をできるだけ少なくするため, 速度を一定に保ち, 且つ低速 (50 [deg/sec]) になるよう PID 制御を行った. ロボットの移動用モーターは PID 制御器に接続されており, PID 制御器は指令装置 (Arduino Mega) に接続されている. 移動用モーターには Maxon 社製の 118730 を用い, 減速比 24 のギアヘッド 134777 を用いた.

図 5.4 に実験装置全体の構成を, 図 5.5 に PID 制御器の外観を示す. マイクロコントローラーには Microchip 社製の PIC16F88 を, モータードライバー (Hブリッジ) には ST Microelectronics 社製の L6203 を用いた. この L6203 には電流計測用のピンが用意されており, ここに値の小さな抵抗を取り付け, 電圧を計測することでオームの法則から電流値を計算することができる.

モーターの角度指令値は UART 通信により Arduino Mega から PIC16F88 に送られ, この値とエンコーダーから得られる角度情報の差を用いて PID 制御を行う. この

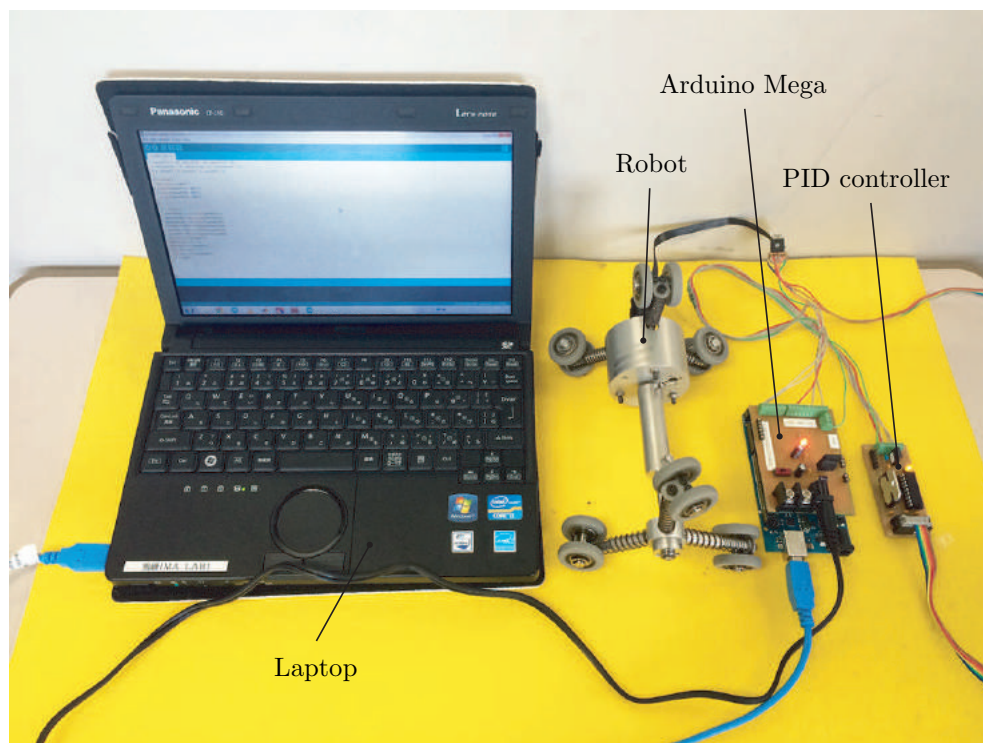


図 5.3: Experimental setup for the motor torque measurement

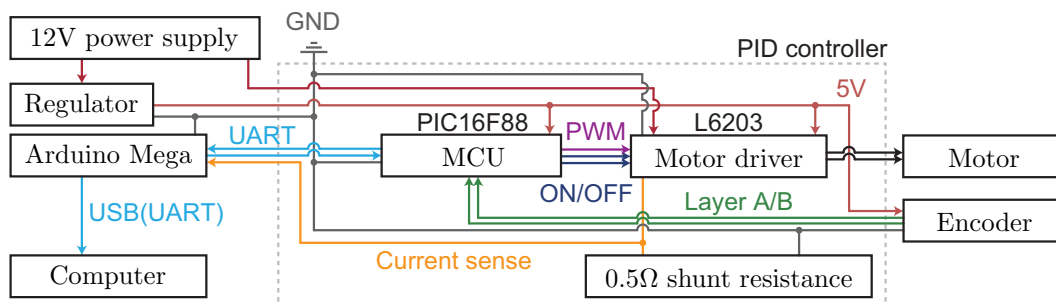


図 5.4: Configuration of the control system for the motor torque measurement

角度情報は同じく UART 通信によって Arduino Mega に送り返される。また、モーターに流れる電流値は $0.5 [\Omega]$ のシャント抵抗に流れる電圧値を Arduino Mega の A/D 変換機能を用いて計測した。以上のデータは USB で Arduino Mega に UART 接続し、Arduino IDE(オープンソースアプリケーション)を用いてコンピュータ上に表示することができる。なお、Arduino Mega と PIC16F88 の間のボーレートは 38400 を、Arduino Mega とコンピュータの間のボーレートは 9600 を用いた。

実験結果

今回、3つの異なるバネ剛性 ($k = 0.1 [\text{N/mm}]$, $k = 0.3 [\text{N/mm}]$, $k = 0.5 [\text{N/mm}]$) を用いて5回ずつモータートルクの計測を行った。腕の自然長、ロボットの長さ(前部ユニットの車輪と後部ユニットの車輪の間の距離)はそれぞれ解析と同じ $l_0 = 67$

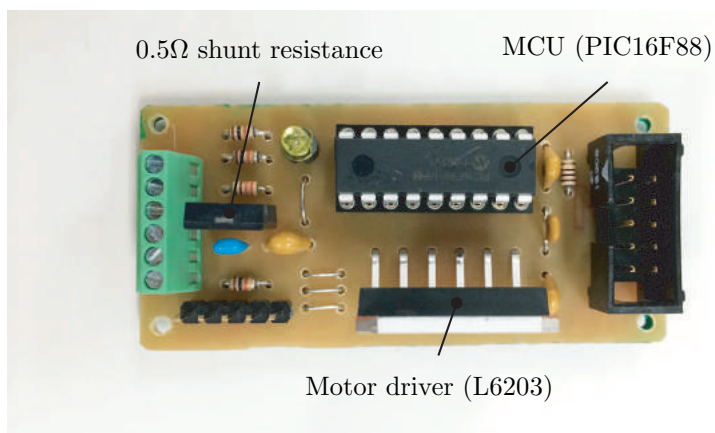


図 5.5: PID controller for the motor torque measurement

[mm], $L_b = 140$ [mm] に設定した. サンプルタイムは 1 [msec] とし, 100 回計測したときの平均値を 100 [msec] ごとに表示した. トルク定数は仕様書に記載されている 8.11 [Nmm/A] を使用し, これから得られたトルクに減速比 24 を掛けた値を使用した. 図 5.6 に実験の様子を示す.

図 5.7 に $k = 0.1$ [N/mm] のときのトルクの計測結果を示す. 図 5.7 (d) は前章で求めたトルクの計算結果を示しており, ここにはあらかじめ計測した無負荷トルク (約 25 [Nmm]) を加えている. 注目すべき箇所は, 前部ユニットの回転に伴って

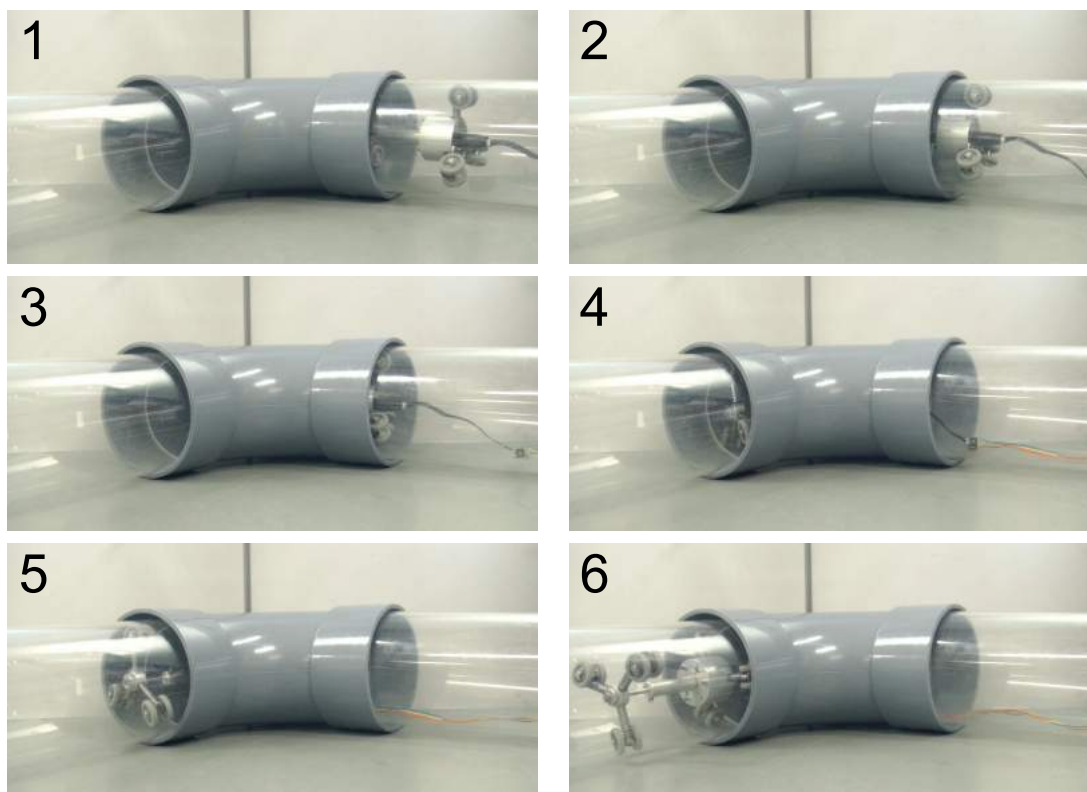


図 5.6: Experimental sequence of the screw-driving pipe inspection robot in a bend pipe

トルクの値が振動を繰り返しながら何度も0に達している点であり、この結果から、曲管内走行中はバネによって腕が伸びようとするときはトルクを必要としないことがわかる。また、一度トルクが0に達していても、再び値は増えているため、腕を縮めようとするときにトルクを必要としていることもわかる。720°から1080°の間で大きくトルクが変化しているが、これはロボットが曲管と直管の接続部分の段差を乗り越えるときのトルクを表しており、曲管走行時よりも大きな値となっている。同様に1080°から1440°の間で見られるトルクの変化は後部ユニットの車輪が段差を乗り越えるときのトルクを表している。1440°以降では値がほぼ一定に推移しているが、これはロボットが曲管から完全出て直管内を走行していることを意味している。一方、回転角度は解析値が曲管走行を完全に終えるまで、約1700°であるのに対し、実験では約1400°となった。伸縮機構のスライダ一部分には機械的な遊びの空間があり、腕の軸に対してわずかながら回転するため、車輪の傾きを正確に一定に保つことは難しく、この誤差が影響したと考えられる。

図5.8に $k = 0.3$ [N/mm] のときのトルクの計測結果を示す。図5.8 (d)は図5.7 (d)

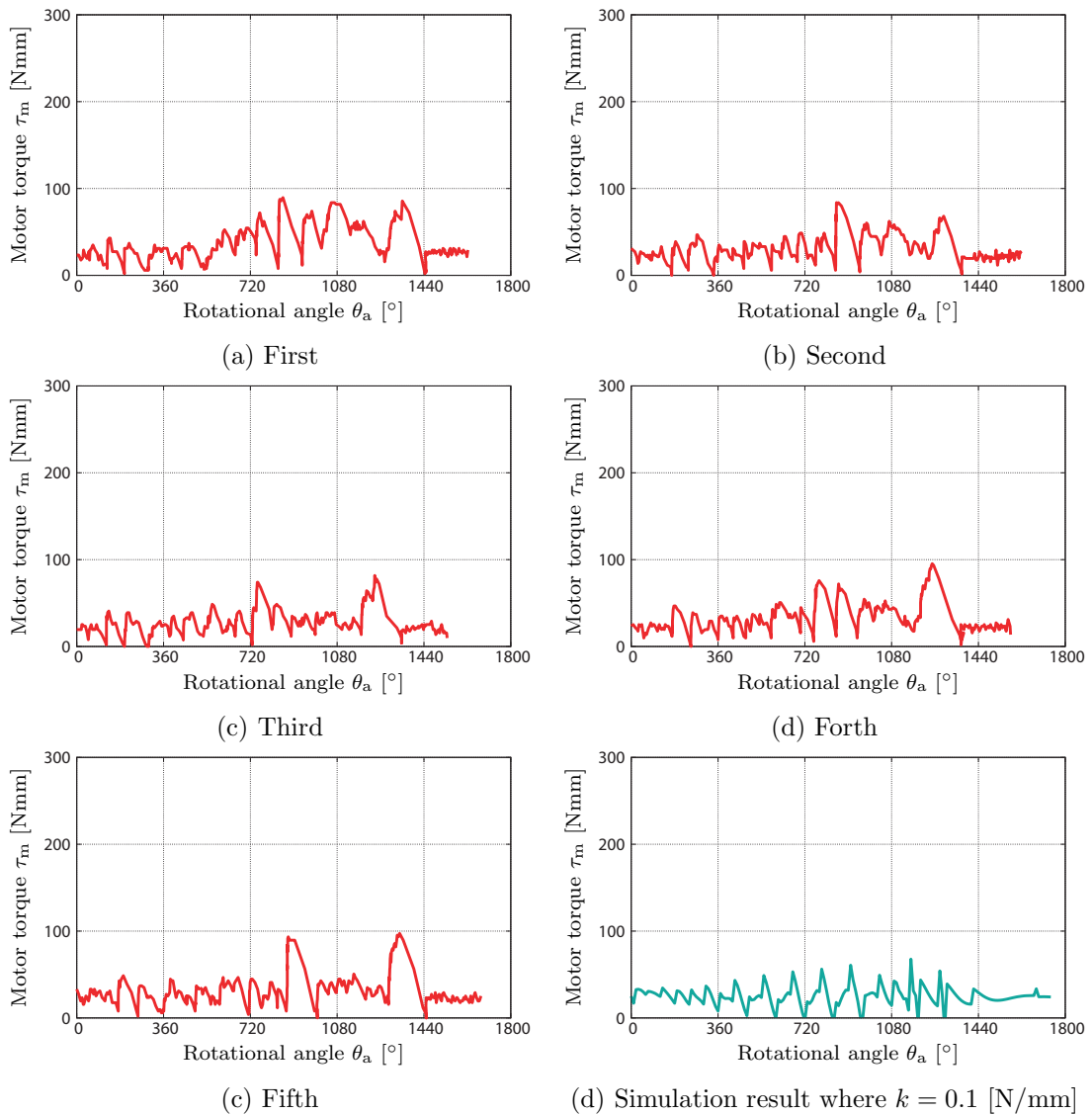


図 5.7: Measured value of the motor torque where $k = 0.1$ [N/mm].

と同様に前章で求めたトルクの計算結果を示しており，ここでもあらかじめ計測した無負荷トルク (約 25 [Nmm]) を加えている．図から，前部ユニットのトルクの値は振動を伴いながら何度も 0 に達しており，一度トルクが 0 に達していても，再び値は増える結果となった．そのため，バネによって腕が伸びようとするときは前部ユニットはトルクを必要とせず，一方で腕を縮めようとするときにはトルクを必要としていることがわかる．720° から 1080° の間で見られるトルクの大幅な上昇は $k = 0.1$ [N/mm] のときの同様にロボットが曲管と直管の間の段差を乗り越える際の値を示している．同様に 1440° 付近では後部ユニットの車輪が段差を乗り越えるため，再度大きなトルクが生じている．回転角度は解析値が曲管走行を完全に終えるまで，約 1700° であるのに対し，実験では約 1440° となった．ここでも伸縮機構のスライダー部分の誤差が影響したと考えられる．

図 5.9 に $k = 0.5$ [N/mm] のときのトルクの計測結果を示す．図 5.9 (d) は図 5.7 (d) 及び図 5.8(d) と同様に前章で求めたトルクの計算結果を示している．この計算値にはあらかじめ計測した無負荷トルク (約 25 [Nmm]) が加えられている．結果か

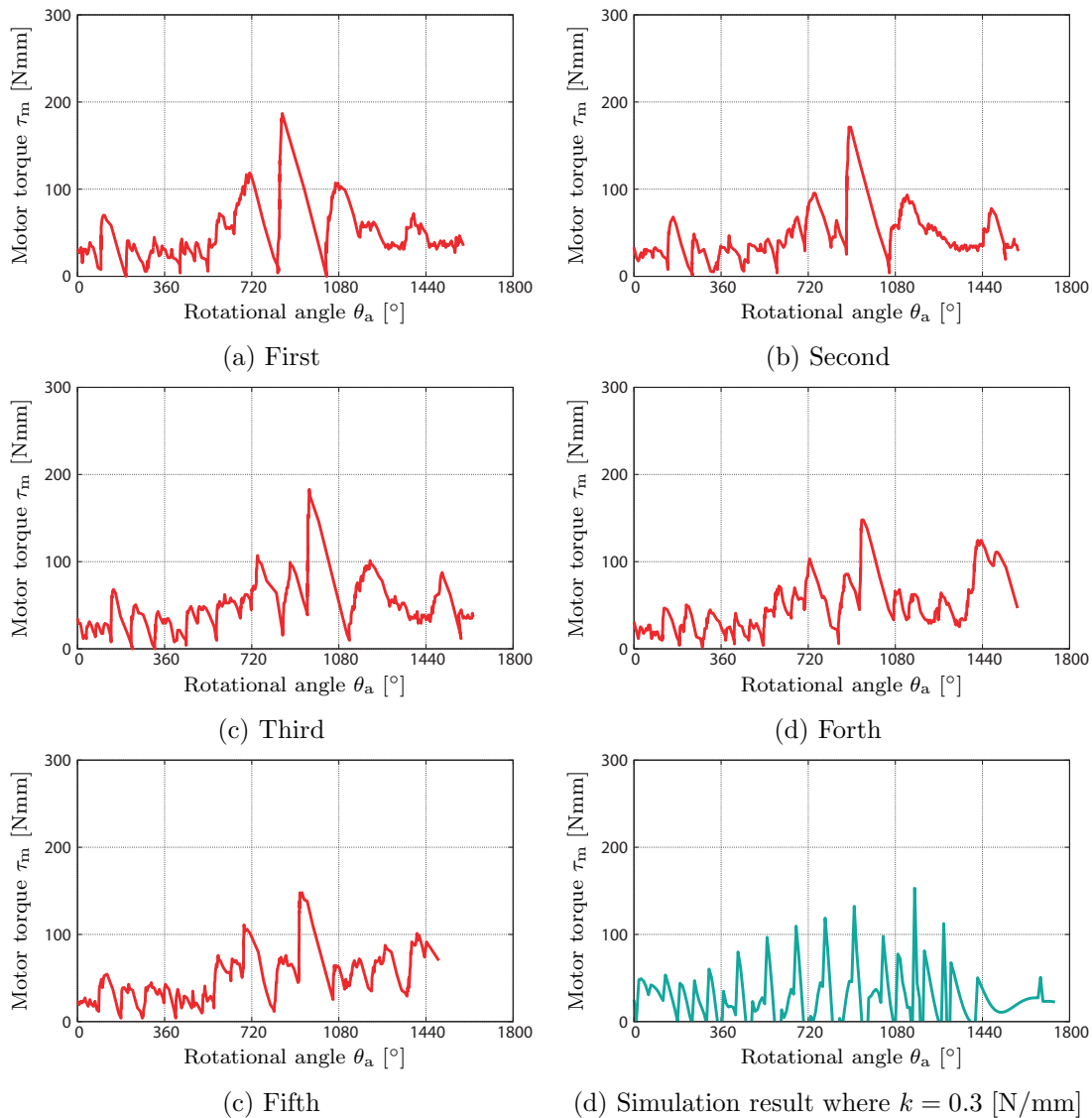


図 5.8: Measured value of the motor torque where $k = 0.3$ [N/mm].

ら、前部ユニットのトルクの値は $k = 0.1$ [N/mm] と $k = 0.3$ [N/mm] のときと同様に何度も0に達しながら増減を繰り返している。ここでも、腕を縮める際にトルクを必要とし、腕を伸ばす際にはトルクを必要としていないため、同様の現象が見られた。720° から 1080° の間で見られるトルクの大幅な上昇は $k = 0.1$ [N/mm] と $k = 0.3$ [N/mm] のときと同様に曲管と直管の間の段差を乗り越える際の値を示している。また、1440° 付近では後部ユニットの車輪が段差を乗り越えるため、大きなトルクが生じている。これらの結果も3つの実験で共通する現象となっている。回転角度の解析値は曲管走行を終えるまで、約1700° であるのに対し、実験では約1440° となった。ここでも $k = 0.1$ [N/mm] と $k = 0.3$ [N/mm] のときと同様に、伸縮機構のスライダー部分の誤差が影響したと考えられる。

全体を通して、0° から 720° の範囲ではトルクの値が同じ傾向を示した。しかし、720° 以降は途中で段差走行時のトルクが発生し、本来の解析を確認することができなかった。そのため、モーターやバネを選定する際、想定される障害物の影響も考慮しなければならないことがわかる。また、回転角度は約1回転分 (360°) の誤差が

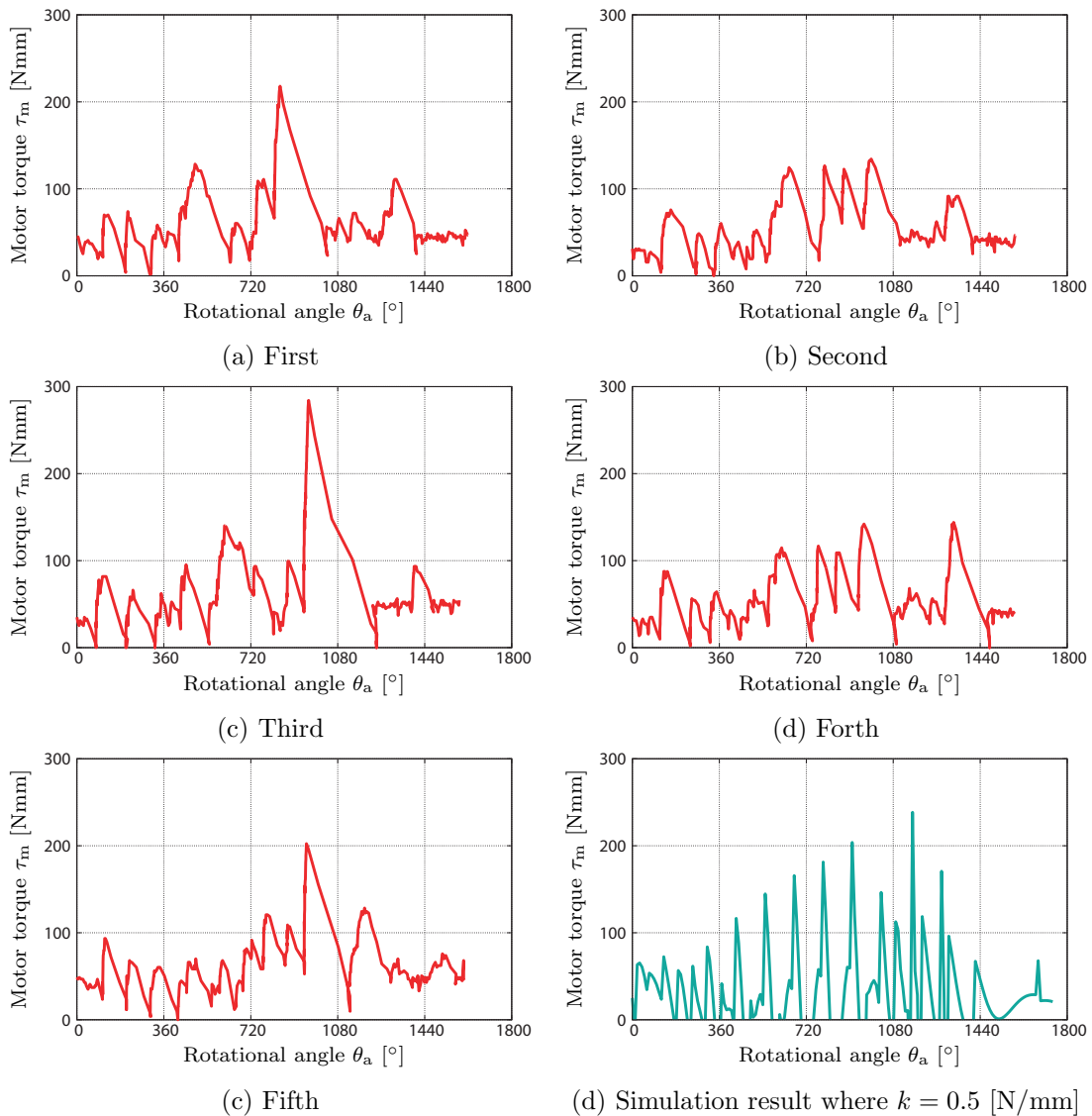


図 5.9: Measured value of the motor torque where $k = 0.5$ [N/mm].

発生した。移動距離は腕の長さ l_a に依存するため、回転角度から移動距離の誤差を一概に特定することはできないが、第3章の解析から1回転分はおおよそ60から70 [mm] であると考えられる。この値は伸縮機構の機械精度を高めることによって小さく抑えられる可能性があり、今後、エンコーダーの計測情報からロボットの移動距離を推定する場合に有効である。

5.2 3モジュール型配管検査ロボットの実験

5.2.1 実験環境

配管には図5.10に示すような塩化ビニル製の直管と曲管(規格: VULL200)を使用した。直管の寸法は内径200 [mm]、長さ500 [mm] となっており、曲管も同じく内径200 [mm] となっている。曲管の曲率半径(管径の中心から曲率半径の中心までの距離)は200 [mm] となっている。伸縮機構のバネ剛性は $k = 0.5$ [N/mm] とした。

5.2.2 基本動作確認実験

まず初めに、3モジュール型配管検査ロボットの基本的な動作確認実験を行った。本実験では図4.30に示したコントローラーを用いて手動で操作を行った。実験結果から、ジョイスティックの方向を変えることにより各モジュールがロボットの体軸に対してそれぞれどのような位置にあっても曲管走破が可能であることがわかった。ただし、 $\theta_a = 0 + 360n^\circ$ や $\theta_a = 60 + 360n^\circ$, $\theta_a = 90 + 360n^\circ$ の状態では、3つのモジュールをすべて同じ速度で制御しても曲管走破が可能であった ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$)。これは、3つのモジュールの内1つのみが曲管の外側に位置する場合、曲管内の上面や下面に位置するその他の2つのモジュールは空間的に余裕があり、曲管の形状



図 5.10: A bent pipe for the experiment of the three modular pipe inspection robot

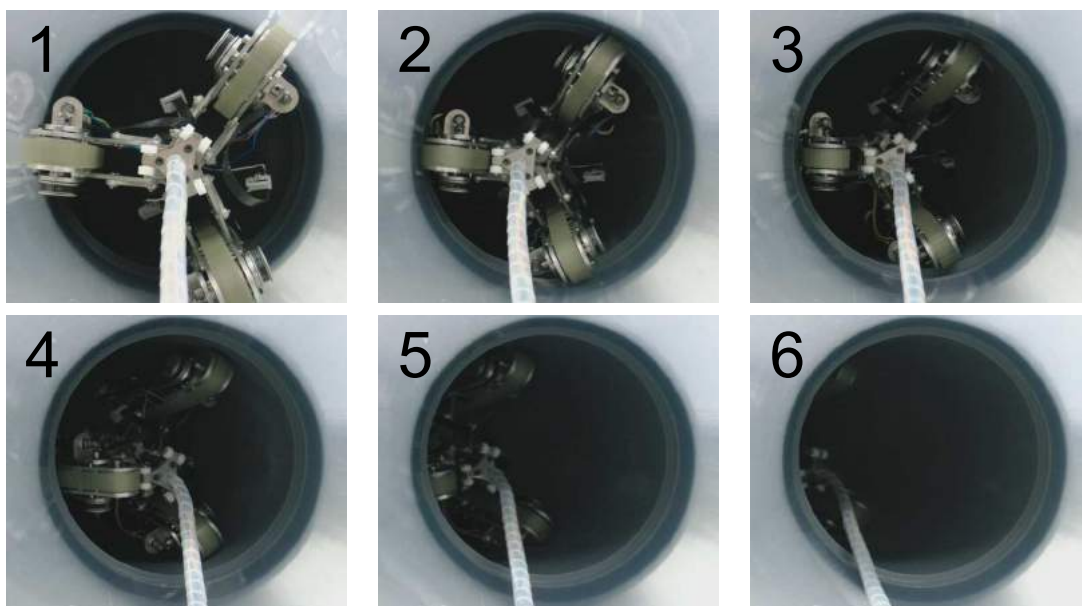


図 5.11: Experimental sequence of the three modular pipe inspection robot in a bend pipe

に合わせて滑りながら方向転換を行えるからであると考えられる。しかし、図 5.11 のように $\theta_a = 30 + 360n^\circ$ としたときはコントローラーによる方向転換を行わなければ走行することができなかった。これは、3つのモジュールのうち2つが曲管の外側に位置すると曲面が壁となり走行を阻害するためであると考えられる。そのため、 $\theta_a = 30 + 360n^\circ$ の状態が曲管走行を行う上で最も厳しい姿勢であると言える。

5.2.3 曲管内走行の基礎理論に基づく実験

次に第3章で求めた3つの速度に基づいた実験を行う。本実験では、すべてのモジュールの速度を同じにした場合と基礎理論に基づいた場合とを負荷の大きさによって比較する。負荷の大きさの計測には、モーターに流れる電流値を用いた。

モーターの入力指令値

今回、モーターの速度制御には一定時間おきに指定した角度を回転させる方法を用いた。図 5.12 は図 3.37 の値を積分した値を示しており、これはプーリーの回転角度に相当する。ロボットの速度は $v_c = 50$ [mm/sec] とし、曲管走行の全過程が 500 [mm] であるため、10 [sec] で走行を終える計算となる。このときの3つのプーリーの回転角度を最小二乗法を用いて時間関数の近似式で表すと、

$$\theta_{w1} = 143.24t \quad (5.1)$$

$$\theta_{w2} = -0.813t^3 + 12.11t^2 + 132.01t \quad (5.2)$$

$$\theta_{w3} = 0.81t^3 - 12.11t^2 + 154.47t \quad (5.3)$$

が得られる。これらの3つの角度指令値を3つのモーターに入力し、ロボットの曲管内走行を行う。しかし、図 5.11 の実験でも述べたように、 $\theta_a = 0 + 360n^\circ$ のとき

は3つのモジュールを同じ速度にしても曲管内走行が可能であった。そこで、最も厳しい条件である $\theta_a = 30 + 360n^\circ$ の姿勢で比較することにした。

図 3.37 と同様に、図 5.13 は $\theta_a = 30 + 360n^\circ$ のときの逆運動学から求めた3つのモジュールのプーリーの回転角度変化量を表しており、これは各プーリーの回転速度に相当する。最も外側に位置するモジュール1及びモジュール2の回転角度変化量 $\Delta\theta_{w1}$, $\Delta\theta_{w2}$ は最も大きく、同じ値を推移している。最も内側に位置するモジュール3の回転角度変化量 $\Delta\theta_{w3}$ は最も小さくなっている。図 5.14 は図 5.13 の値を積分した値を示しており、これはプーリーの回転角度に相当する。ロボットの速度はこ

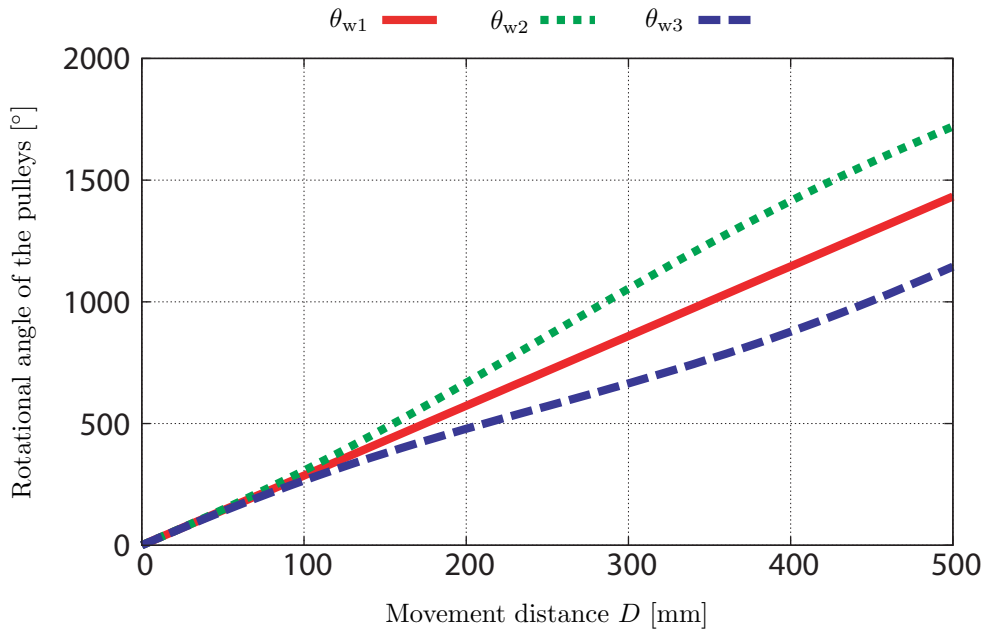


図 5.12: Rotational angle of the pulleys where $\theta_a = 0 + 360n^\circ$

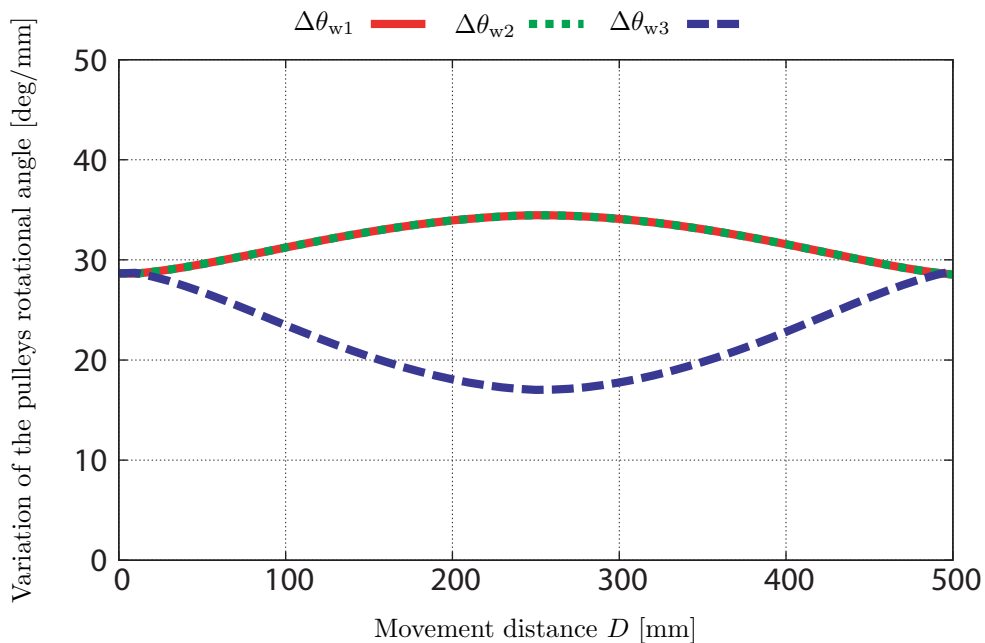


図 5.13: Variation of the pulleys rotational angle where $\theta_a = 30 + 360n^\circ$

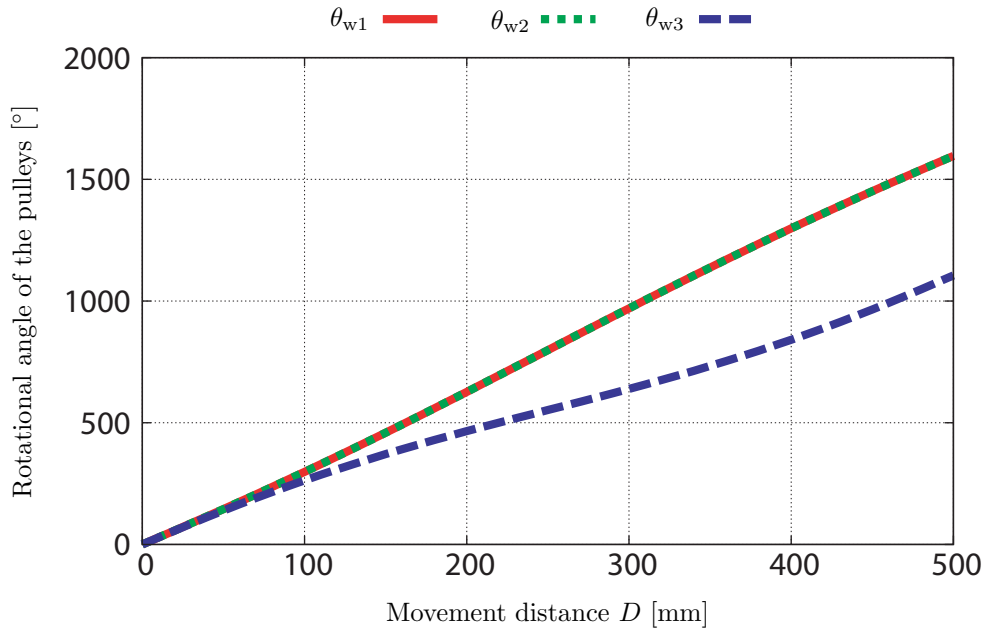


図 5.14: Rotational angle of the pulleys where $\theta_a = 30 + 360n^\circ$

こでも $v_c = 50$ [mm/sec] とした. 3つのプーリーの回転角度は式 (5.3) と同様に最小二乗法を用いて時間関数の近似式で表すことができる.

$$\theta_{w1} = -0.46t^3 - 6.84t^2 + 136.98t \quad (5.4)$$

$$\theta_{w2} = -0.46t^3 - 6.84t^2 + 136.98t \quad (5.5)$$

$$\theta_{w3} = 0.92t^3 - 13.68t^2 + 155.78t \quad (5.6)$$

この角度値を時間に応じて目標値として与えることで, 3つのモーターを図 5.13 に応じた速度で制御することができる. ロボットの速度は $v_c = 50$ [mm/sec] としているため, 10 [sec] で曲管内走行を終える計算となるが, その後は 10 [sec] の瞬間の速度を各モーターに与え続けることとする.

実験装置

図 5.15 に実験装置の外観を, 図 5.16 に実験装置全体の構成を, 図 5.17 に PID 制御器の外観をそれぞれ示す.

マイクロコントローラーには Arduino Nano を, モータードライバー (Hブリッジ) には ST Microelectronics 社製の L6203 を用いた. ここでも螺旋駆動型配管検査ロボットのとおり同じ方法で電流値を計算した.

モーターの角度指令値はあらかじめ Arduino Nano に設定しておき, この値とエンコーダーから得られる角度情報の差を用いて PID 制御を行う. 角度情報は UART 通信によって Arduino Nano から Arduino Mega に送られる. モーターに流れる電流値は螺旋駆動型配管検査ロボットのとおり同様に 0.5 [Ω] のシャント抵抗に流れる電圧値を Arduino Mega の A/D 変換機能を用いて計測した. 以上のデータは USB で Arduino Mega に UART 接続し, Arduino IDE (オープンソースアプリケーション)

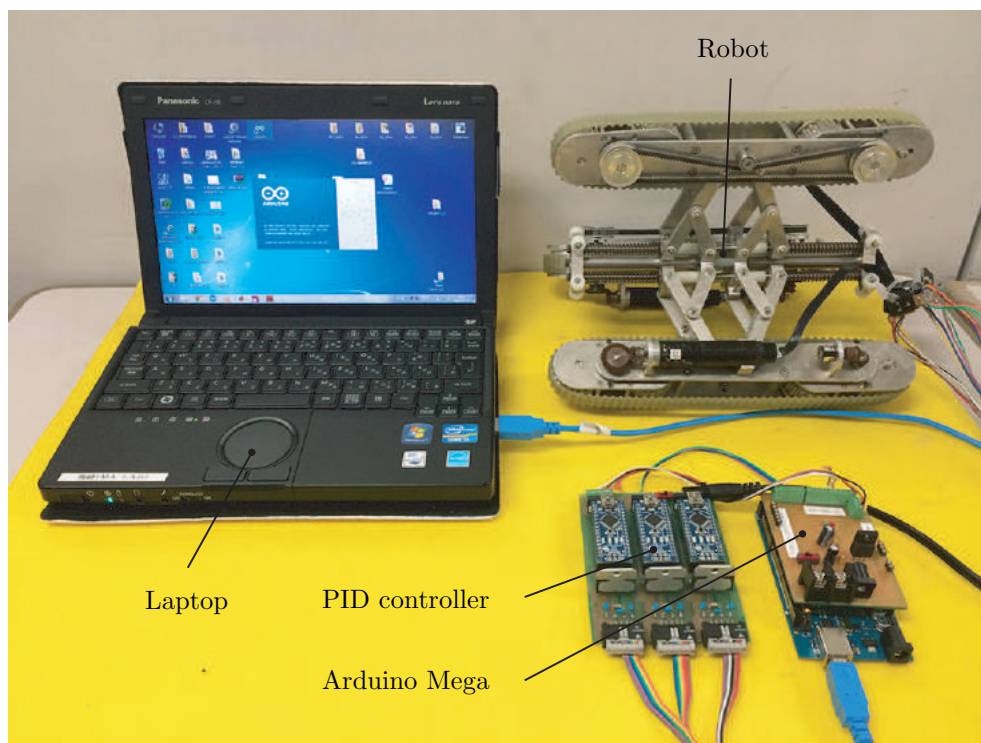


図 5.15: Experimental setup for the three modular pipe inspection robot

を用いてコンピューター上に表示した。なお，Arduino Mega と Arduino Nano の間のボーレートは3つの接続すべてにおいて 9600 を用いた。

実験結果

まず初めに， $\theta_a = 0 + 360n^\circ$ のときの実験結果について3つのモジュールの速度が同じ場合と異なる場合で比較を行った。電流値の計測結果を図 5.18 に示す。いずれの場合でも走行は可能であったが電流値にわずかながら違いが見られた。まず，どちらのグラフにおいても約 2 から 3 [sec] 付近で電流値が大きくなっているが，これは直管と曲管の接合部分の段差によるものである。その後，図 5.18 (a) に示すように速度が同じ場合では 7 から 8 [sec] 付近から電流値が上がり，すべてのモジュールが 0.3 から 0.5 [A] 付近を推移している。ロボットが曲管内でも直進し続けようとすると，曲管の曲面が壁となってモジュール 1 やモジュール 2 の電流値が大きくなる。そのため，ロボットの姿勢が崩れ 3 つのモジュールすべてに大きな電流が必要になる。また，10 [sec] 付近ではロボットは再び直管と曲管の接合部分の段差に遭遇するため，この影響も少なからず受けている。

一方，図 5.18 (b) に示すように速度が異なる場合では，10 [sec] 付近から電流値は上がるものの，曲管の最も外側に位置するモジュール 3 の電流値が最も大きく，最も内側に位置するモジュール 2 の電流値が最も小さくなっている。10 [sec] 付近では，速度が同じ場合と同様に直管と曲管の接合部分の段差の影響により電流値が高くなっている。以上の結果から，速度が同じ場合と異なる場合では電流値に違いが見られ，どちらの場合においても走行は可能であるが，速度が異なる場合の方が電

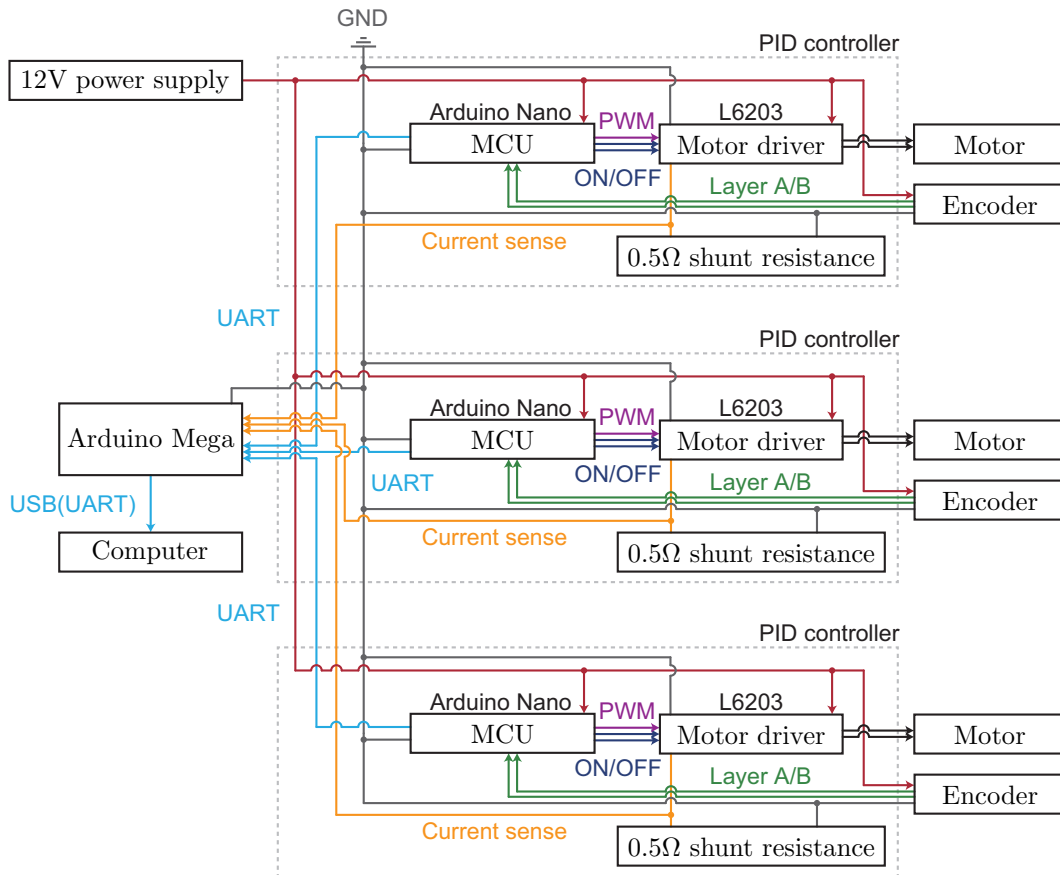


図 5.16: Configuration of the control system for the three modular pipe inspection robot

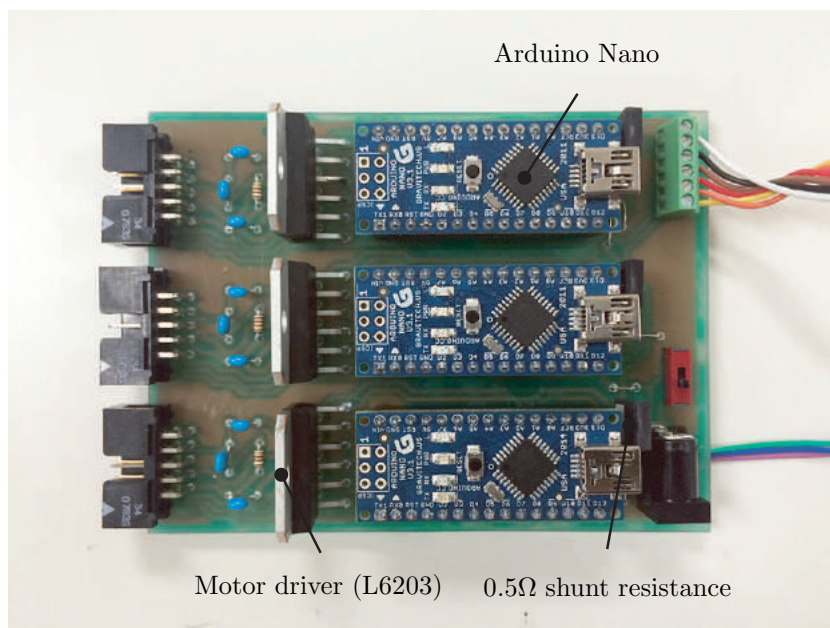


図 5.17: PID controller for the three modular pipe inspection robot

流値の値を少なく抑えることができ、各モジュールに加わる負荷を低減できることが明らかとなった。

次に最も厳しい姿勢の条件である $\theta_a = 30 + 360n^\circ$ のときの実験結果について 3 つのモジュールの速度が同じ場合と異なる場合で比較を行った。顕著にその違いが見られたのは 3 つのモジュールを同じ速度で制御した場合であり、途中でロボットが配管内に詰まってしまう結果となった。また、図 5.19 に示すように電流値は最大 1.5 [A] と非常に大きな値となっており、ネジの締め直し等のメンテナンスが必要なほど大きな力が加わった。本実験ではロボットの故障を考慮し、同じ速度の実験回数は 1 回のみとした。

一方、異なる速度で制御したときの様子を図 5.20 に、電流の計測結果を図 5.21 に示す。実験は 5 回行い、すべてにおいてロボットは曲管内走行可能であった。グラフから、曲管の最も外側に位置するモジュール 1 とモジュール 2 の電流値は曲管内の曲面に接触し始める 5 [sec] 付近で大きくなったが、その後は図 5.19 ほど大きな値とはならなかった。最も内側に位置するモジュール 3 の電流値が 12 [sec] 付近で、最も外側に位置するモジュール 2 の電流値が 15 [sec] 付近で非常に大きな値になっているが、これはロボットが次の直管に差し掛かった際に接合部分の段差に接触したことによるものである。このとき、残りのモジュール 1 は配管上部に位置しているため、段差があってもモジュール 2 や 3 ほど走破に大きな電流を要していないこと

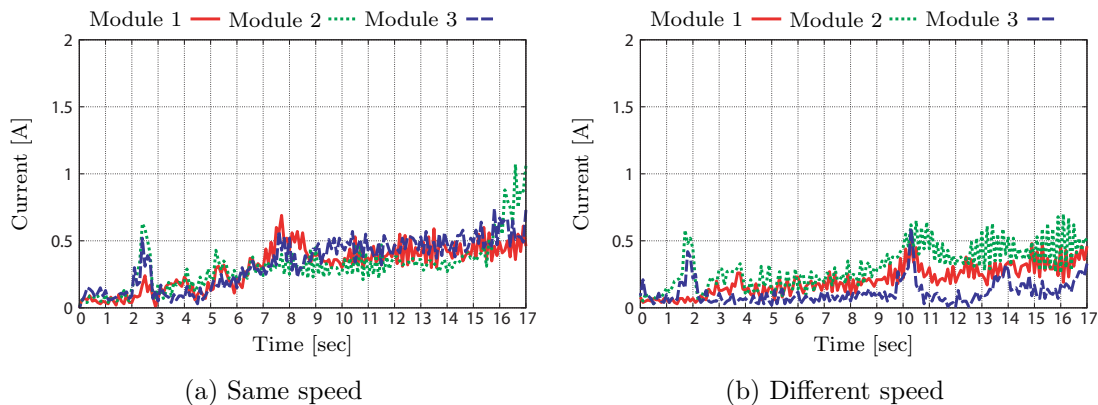


図 5.18: Motor current where $\theta_a = 0 + 360n^\circ$.

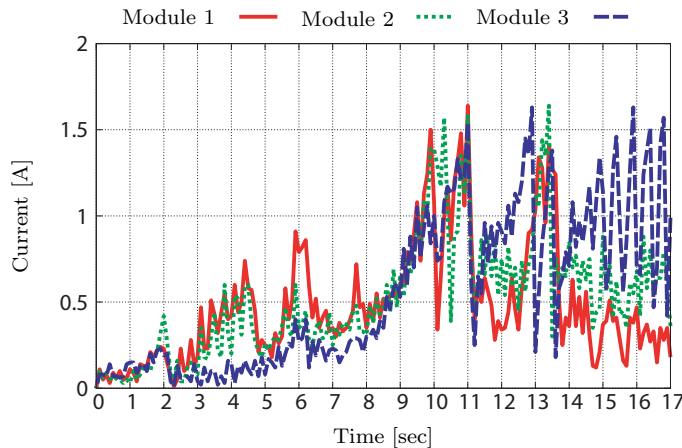


図 5.19: Motor current with same speed where $\theta_a = 30 + 360n^\circ$.

がわかる。モジュール3と2に時間差があるのは、モジュール3の方が早く直管と曲管の接合部に達するからである。

また、図5.19に示すように、ロボットはある程度曲管内を進むと進行方向に対して反時計周り (Z 軸負周り) に回転した。これは図4.14で示したモジュールの揺動現象によって、モジュール3の腕の実質長さが短くなり、曲管内側に空間的な余裕ができたことが原因として挙げられる。通常、 $\theta_a = 30 + 360n^\circ$ の姿勢は静的に安定しておらず、常に重力の影響を受け、進行方向に対して反時計周りに回転しようとする傾向がある。配管内ではすべてのモジュールが壁面に押さえつけられているため、摩擦によってこの回転が抑制されているが、曲管内側のモジュールに加わる垂直抗力が小さくなれば、回転を始める。このことは進行には問題ないが、ロボットの曲管走行後の姿勢を把握する上では考慮しておくべき現象である。

今回はロボットの移動速度を $v_c = 50$ [mm/sec] としているため、図5.13から曲管内走行を10 [sec] で終えるべきであったが、実際には約17 [sec] を要した。各モジュールは曲管に入る際と出る際に段差に衝突し、進行が阻害されているため、多くの時間を段差乗越えに要していることがこの原因の1つとして考えられる。

以上の結果から、最も厳しい姿勢の条件である $\theta_a = 30 + 360n^\circ$ のときであっても本手法を用いれば曲管走行が可能になり、また、ロボットに加わる負荷も低減できることが明らかとなった。

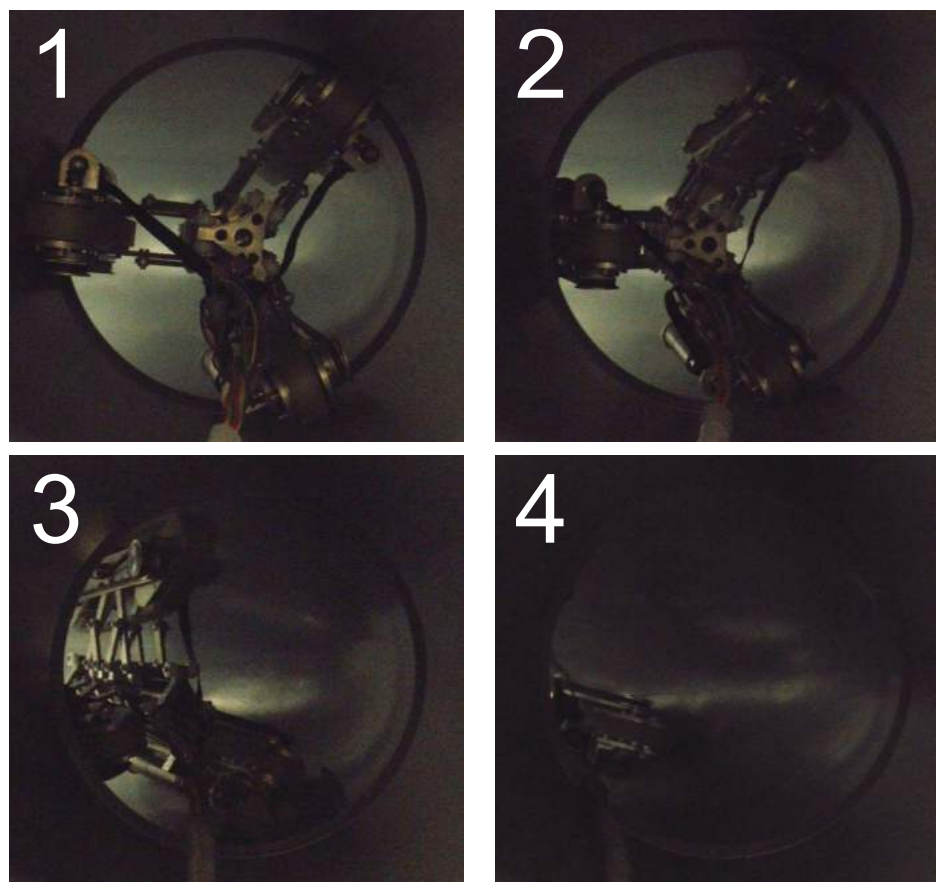


図 5.20: Experimental sequence of the three modular pipe inspection robot with different speed where $\theta_a = 30 + 360n^\circ$

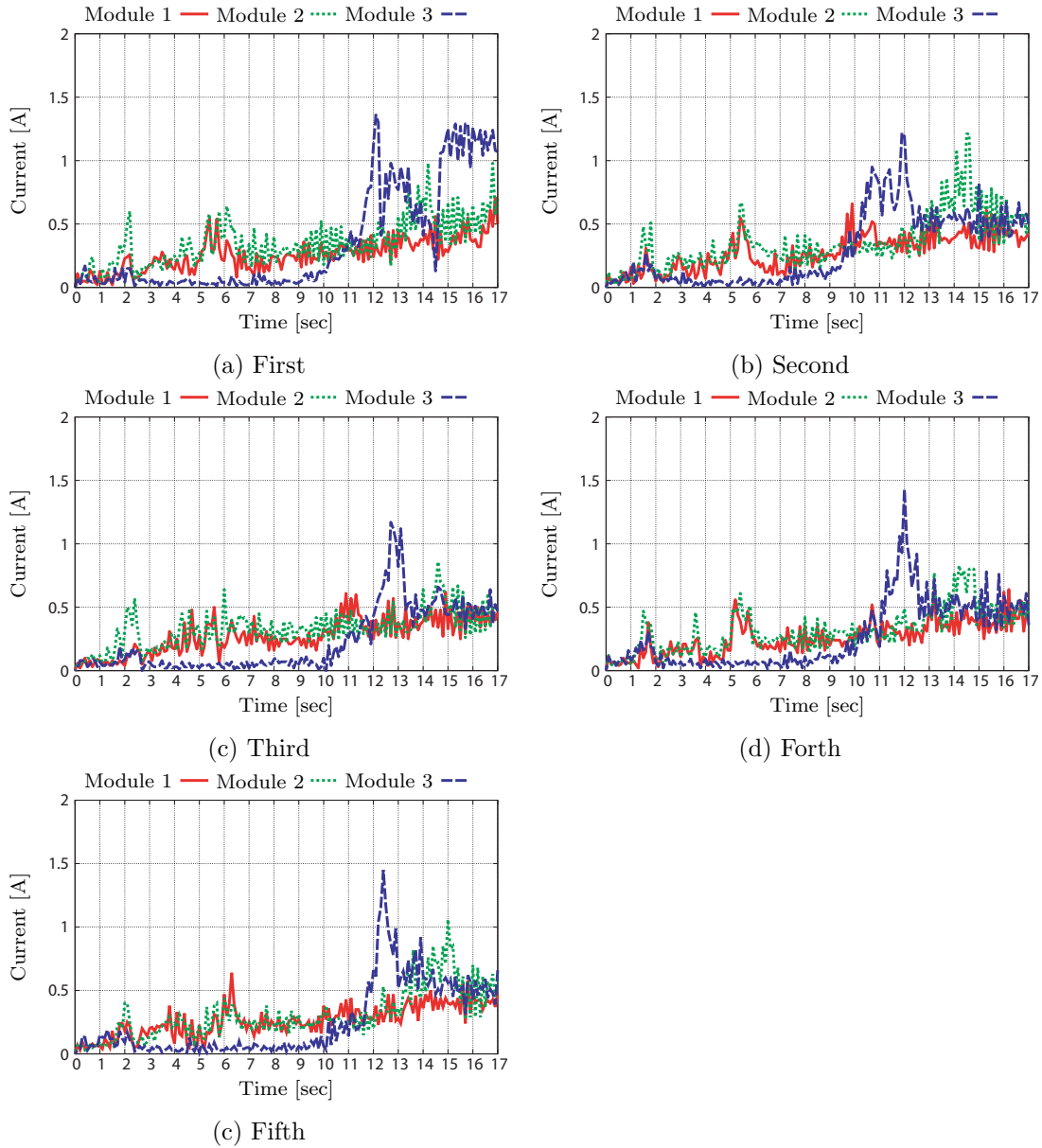


図 5.21: Motor current with different speed where $\theta_a = 30 + 360n^\circ$.

5.3 まとめ

本章では、開発した螺旋駆動型配管内検査ロボット及び3モジュール型配管検査ロボットの曲管内走行実験について述べた。どちらの場合も、まず第4章で示した操作用コントローラーを用いて基本動作確認を行った。その後、第3章の走行理論や第4章の設計要件を確認するため、各種実験を行った。

実験から、走行理論に基づいた設計を行うことにより、螺旋駆動型の場合では、設計段階で腕の長さやバネ定数の設計を行えること、また、3モジュール型の場合では、より負荷の少ない曲管走行が可能であることを確認できた。

第 6 章

T字管内走行実験

本章では，開発した螺旋駆動型配管検査ロボットと 3 モジュール型配管検査ロボットの T 字管内走行実験について述べる．

6.1 螺旋駆動型配管検査ロボットの実験

6.1.1 実験環境

配管にはアクリル製の直管と塩化ビニル製の T 字管 (図 6.1) を使用した．直管の寸法は曲管内走行実験で使用したものと同じく内径 125 [mm]，長さ 1000 [mm] となっており，T 字管の内径も 125 [mm] (規格：VU DT125) となっている．伸縮機構のバネ剛性は $k = 0.3$ [N/mm] を，腕の自然長は 67 [mm] とした．コントローラーは図 4.10 で示したものを扱い，手動で操作を行った．

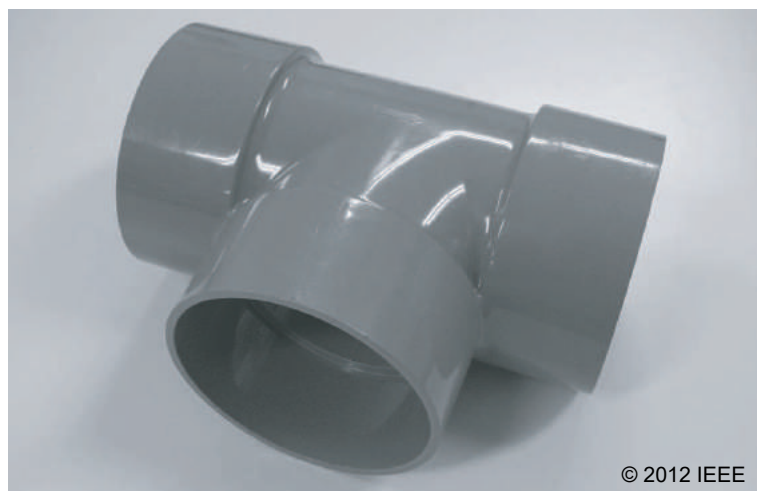


図 6.1: A T-branch for the experiment of the screw-driving pipe inspection robot

6.1.2 実験結果

T字管は経路が必ず二手に分かれており，その走行パターンは以下の3つに分けられるため，これらの条件で実験を行った．

パターン1 進行方向に対して左右に分岐した状況で左右どちらかに移動．

パターン2 進行方向に対して直進方向と右あるいは左のどちらかに分岐した状況で左右どちらかに移動．

パターン3 進行方向に対して直進方向と右あるいは左のどちらかに分岐した状況で直進．

試行回数はそれぞれ5回とした．図6.2はパターン1の実験結果を，図6.3はパターン2の実験結果を示している．結果からロボットは5回ともT字管を走行可能であることがわかった．

図6.4はパターン3の実験結果を示している．結果から，ロボットの左部分が配管内壁面と接触していない状態でもその他の部分で車輪が接触することにより5回中すべてにおいて前進できることがわかった．しかし，ローターが長時間空転をしなければ次の配管にたどり着くことができなかった．これは進行方向に対して左に空間ができ，腕が伸びきった状態で回転したため，十分な壁面押付力を得られなかったことが原因として考えられる．

図6.5は差動機構によるロール軸周りの回転動作の実験結果を示している．結果から，経路が右を向いているT字管内においてロボットの屈曲方向が上下である場合，屈曲動作のための力が中央ユニットの回転へと切り替わり，屈曲方向を変えられることがわかった．設計では，ロボットは前進せずにその場でロール回転を行うことを想定していたが，実際には少しずつ前に進みながらロール回転を行った．こ

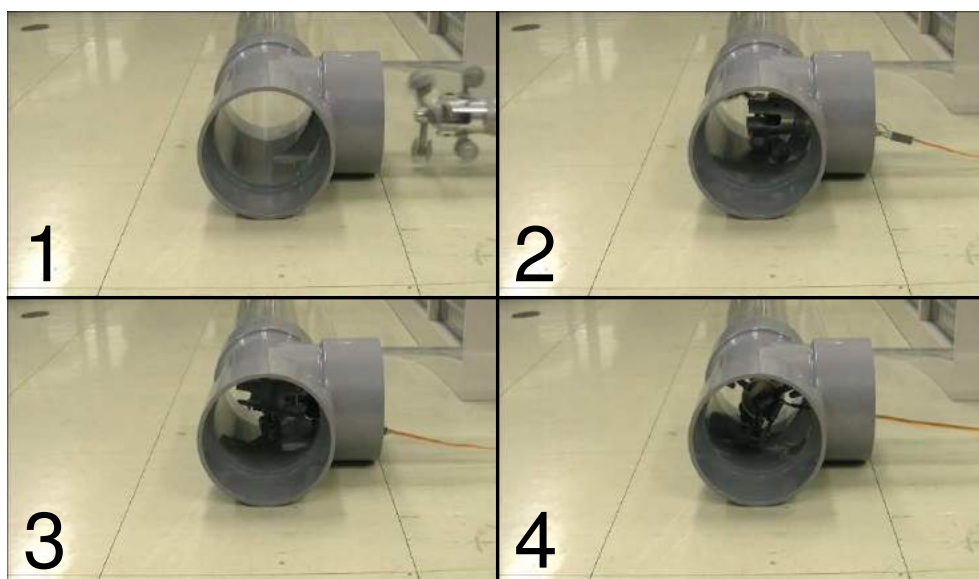


図 6.2: Turning right at a T-branch which branches to left and right (screw-driving type)

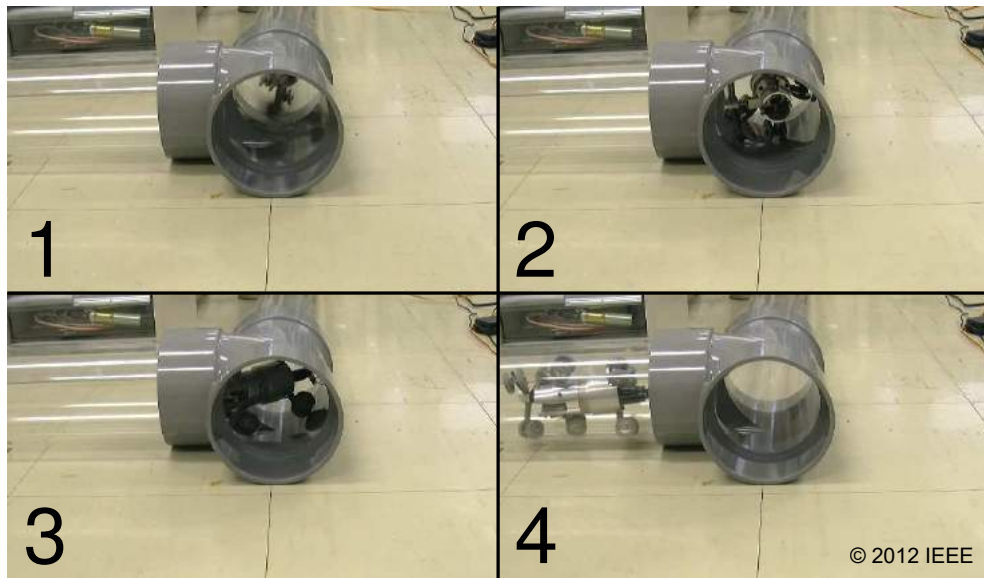


図 6.3: Turning right at a T-branch which branches to straight and right (screw-driving type)

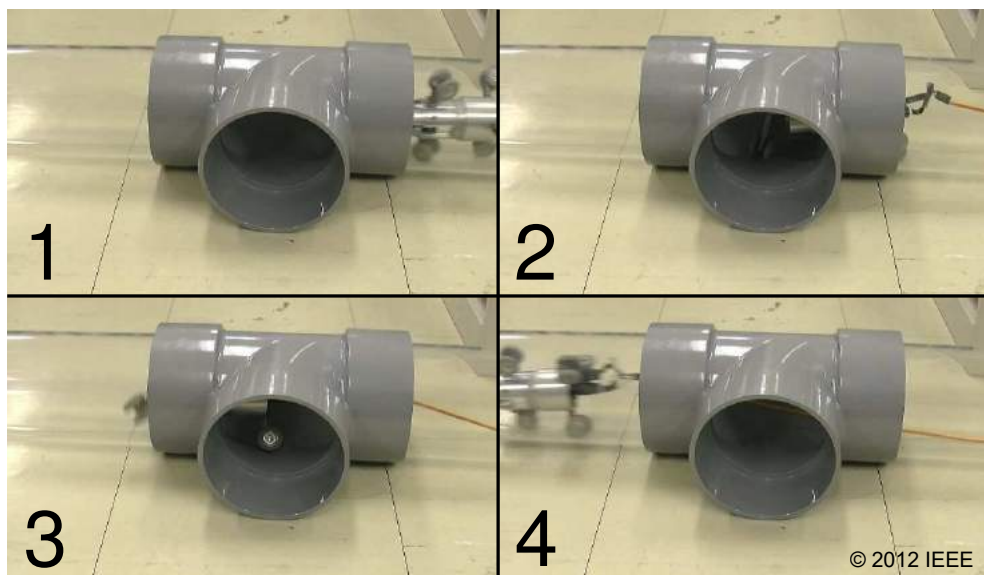


図 6.4: Moving forward in a T-branch (screw-driving type)

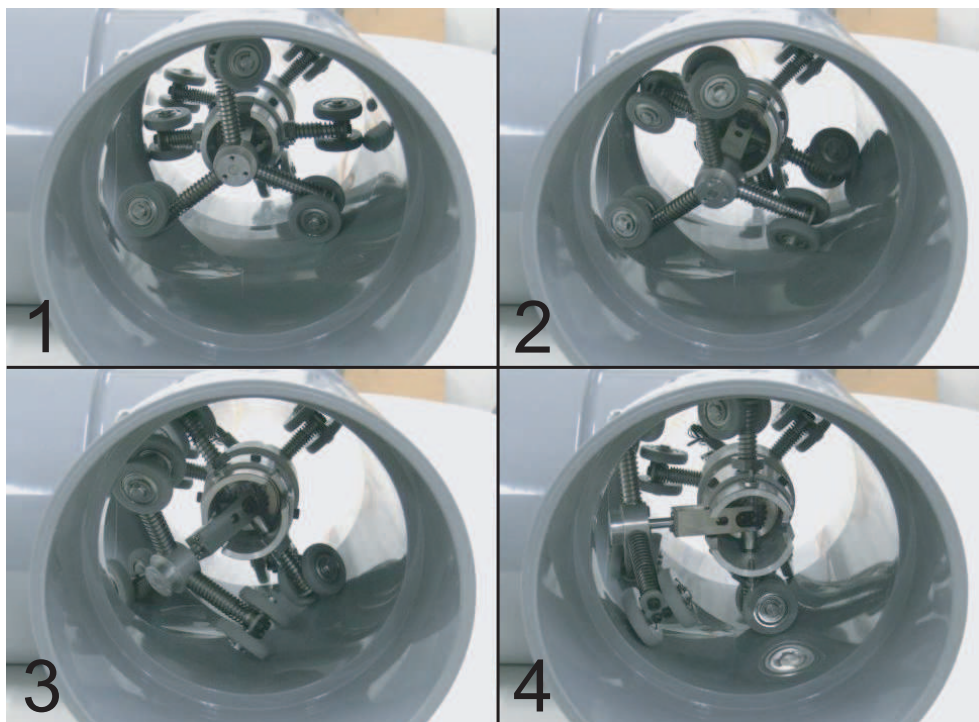


図 6.5: Passive rolling motion at a T-branch

の原因として、中央ユニットの腕がキャスターのように十分に回転していなかったことが挙げられる。そのため、中央ユニットの腕がローテーターと同じ機能を持ってしまい螺旋を描きながらわずかに前進した。これを防ぐためにはロール回転時に中央ユニットの車輪が十分に回転するような引張バネの剛性の設計が必要となり、これは車輪と配管内壁面との摩擦係数や腕の壁面押付力等に依存する。

6.2 3モジュール型配管検査ロボットの実験

6.2.1 実験環境

配管には塩化ビニル製の直管とT字管(図6.6)を使用した。直管の寸法は曲管内走行実験で使用したものと同じく内径200 [mm]、長さ500 [mm]となっており、T字管の内径も200 [mm](規格: VU DT200)となっている。伸縮機構のバネ剛性は $k = 0.5$ [N/mm]とし、第4章で示した設計と同じ値を使用した。

6.2.2 実験結果

今回、螺旋駆動型配管検査ロボットのとくと同様に以下の3つのパターンで実験を行った。

パターン1 進行方向に対して左右に分岐した状況で左右どちらかに移動。

パターン2 進行方向対して直進方向と右あるいは左のどちらかに分岐した状況で左右どちらかに移動.

パターン3 進行方向対して直進方向と右あるいは左のどちらかに分岐した状況で直進.

コントローラーは図4.30で示したものを扱い、手動で操作を行った。試行回数はそれぞれ5回とした。

図6.7はパターン1の実験結果を示している。結果は5回のうち3回のみ走破可能であった。走破できなかった原因として、それぞれのモジュール側面にあるモーターやタイミングプーリーが接触してしまい、推進力を十分に得られなかったことが挙げられる。また、走行できた場合であっても、操作者が何度もロボットを見ながら位置を調整する必要があり、安定した走破が困難であった。

一方、パターン2の実験では5回中一度も走破できなかった。図6.7はパターン2の実験で身動きが取れなくなった状態を示している。これは、図4.14で示したモジュールの揺動現象によって進行方向に対して右側のモジュールが開いてしまい、図6.7の右図のようにT字管内部の角に引っかかったことが原因として考えられる。この状態では、旋回軌道に対して最も内側に位置するモジュール3のみで推進力を発生させなければならず、どれだけ大きなトルクでロボットを駆動させても移動することは困難となった。文献[19]や[20]で紹介されている3モジュール型配管検査ロボットはT字管内であっても旋回可能であったが、これは用いられている配管の内部の角が滑らかな曲面を描いているものであったため、外側のモジュールが多少開いてしまっても曲面から推進力を発生させて進むことができたと推測できる。このことは3モジュール型配管検査ロボットを開発する上で大きな課題となる。

また、パターン3の実験ではパターン2と同様の問題が発生したため5回中一度も走破できなかった。図6.9はパターン3の実験で身動きが取れなくなった状態を示している。ここで重要な点はパターン2の実験結果と同様に進行方向に対して左



図 6.6: A T-branch for the experiment of the three modular pipe inspection robot

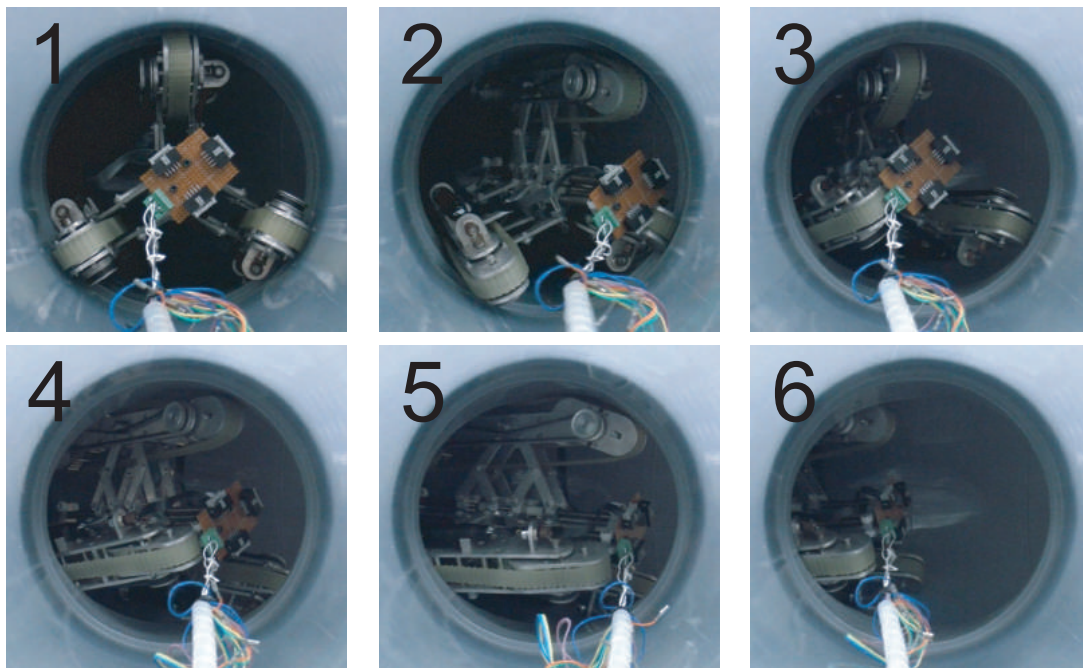


図 6.7: Turning left at a T-branch which branches to left and right (three modular type)

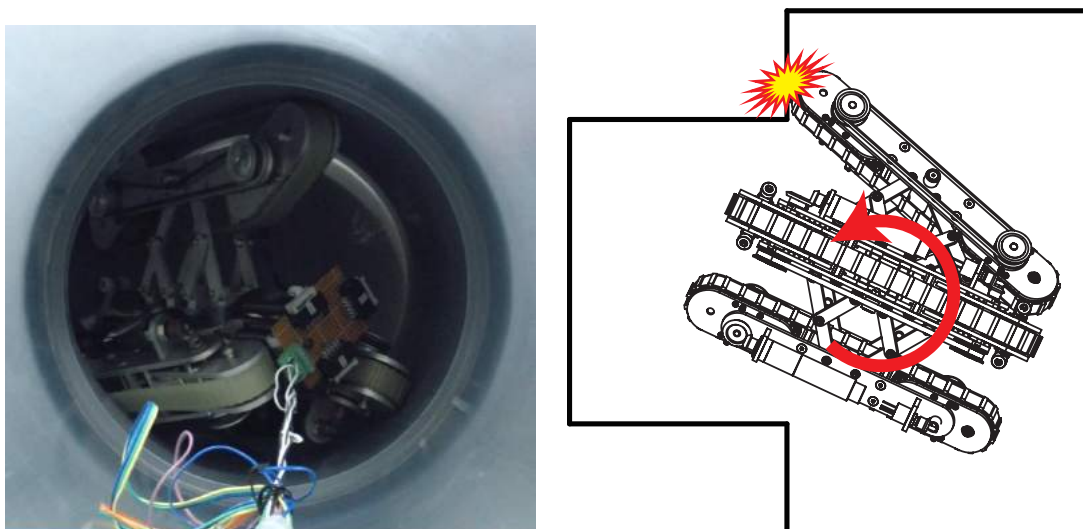


図 6.8: Turning left at a T-branch which branches to stright and left (three modular type)

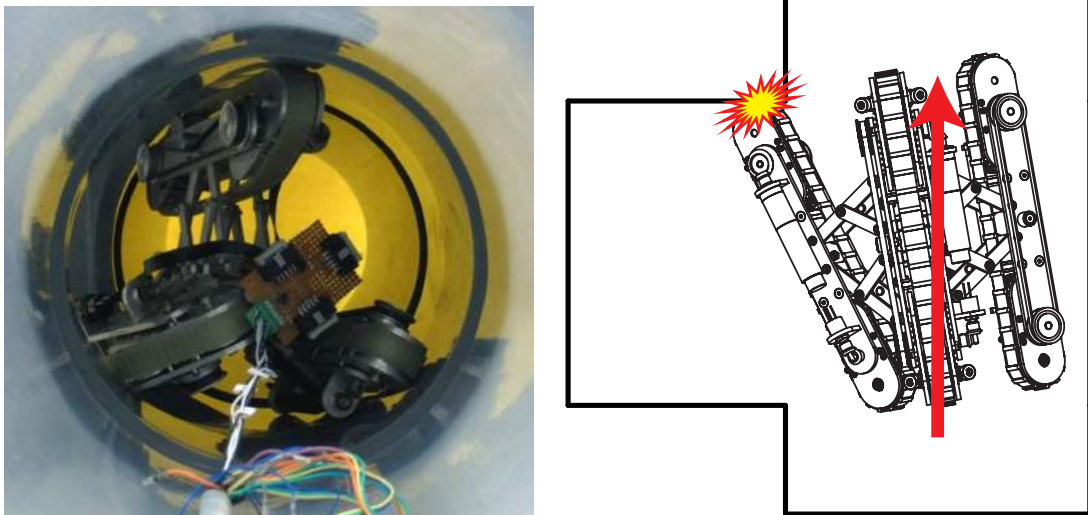


図 6.9: Moving forward in a T-branch (three modular type)

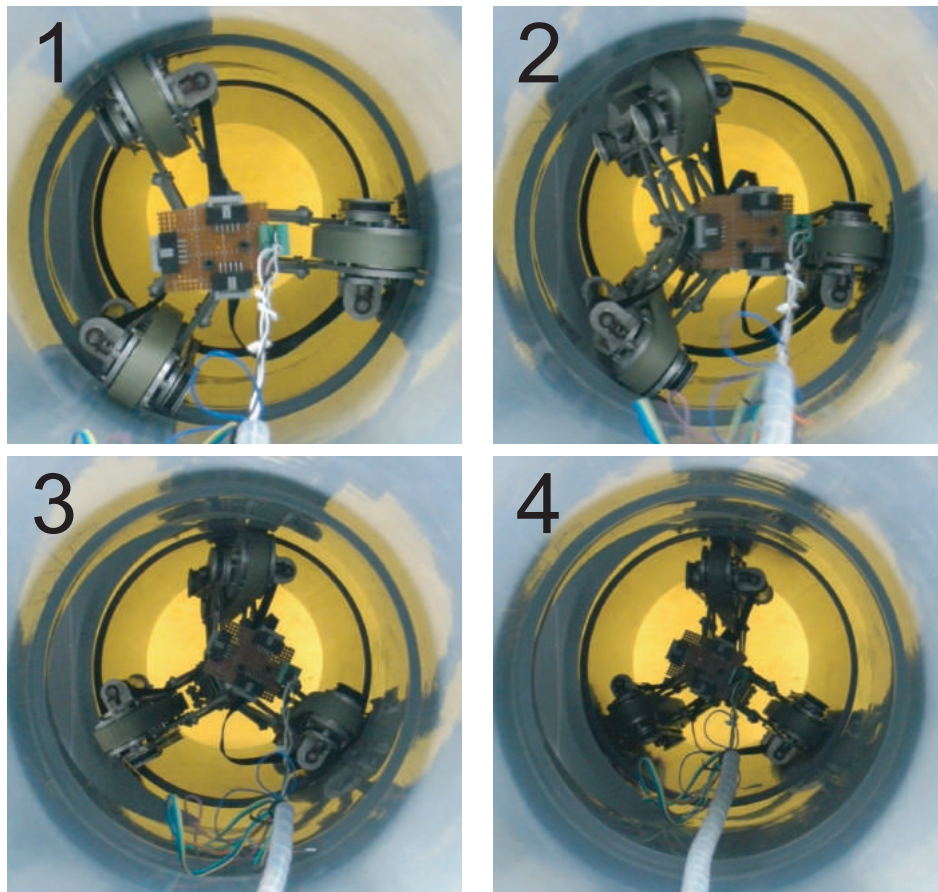


図 6.10: Moving forward with different position (three modular type)

側のモジュールが開いてしまっていることである。ロボットが T 字管に差し掛かると、分岐した方向の空間が空いているためモジュールの 1 つがその方向へ移動してしまい、その結果、実験では図 6.9 の右図のように T 字管内部の角に引っかかってしまう現象が起きた。そのため、図 6.10 に示すような姿勢で実験を行うと走行することができた。この結果から、モジュールがロボット本体に対して開いてしまっ

も、T字管内部の角との接触が浅い所で発生すれば、通常の障害物走破と同様に適応可能であることがわかる。

6.3 まとめ

本章では、開発した螺旋駆動型配管内検査ロボット及び3モジュール型配管検査ロボットのT字管内走行実験について述べた。どちらの場合も、まず第4章で示した操作用コントローラーを用いて動作確認を行った。結果から、螺旋駆動型配管内検査ロボットの経路選択機構はT字管内において高い走破性能を示した。一方、3モジュール型配管検査ロボットは図4.14で示したモジュールの揺動現象により、十分な走破性能を実現することはできなかった。これらの結果から得られる考察及び今後の課題を次章の結論で述べる。

第7章

結論と今後の課題

7.1 結論

第1章「序論」では、本研究に至った背景と目的を述べた。老朽化の進んだ配管設備は喫緊の社会問題となっており、人間の代わりに配管内を検査する配管検査ロボットの期待が高まっていることを示した。これらのロボットは連結能動関節型と干渉駆動型に分類され、それらはいずれも曲管内走行とT字管内走行が未だ大きな障壁となっていることを示した。そこで本論文では、連結能動関節型の1つである螺旋駆動型配管検査ロボットと干渉駆動型の1つである3モジュール型配管検査ロボットに着目し、曲管走行やT字管走行の基礎理論に基づいた設計による走破性の向上とその評価を目的とした。

第2章「配管検査ロボットの移動原理」では、螺旋駆動型配管検査ロボットと3モジュール型配管検査ロボットの移動原理についてそれぞれ解説した。螺旋駆動型配管検査ロボットの移動原理では、力学的な関係からロボットが螺旋を描く原理を説明し、モーターの回転角度とロボットの移動距離の関係を示した。3モジュール型配管検査ロボットの移動原理では、3つのモジュールとロボット全体の運動学的な関係を明らかにし、ロボットの目標角速度と目標並進速度を与えたときの3つのモジュールのプーリーで発生すべき回転速度を求めた。

第3章「曲管内及びT字管内走行の基礎理論」では、まず、曲管の経路が連続するため、螺旋駆動型配管検査ロボットと3モジュール型配管検査ロボットのいずれの場合においても接触点の推定が可能であることを示し、2次元モデルを用いた共通の手法から重心軌道が緩和曲線を含む曲線によって近似できることを示した。ここで得た重心軌道を基に、曲管内の空間的な制約を断面形状から明らかにし、伸縮機構の拡張範囲を求めた。一方、T字管内走行の基礎理論では、経路が連続しておらず、分岐した部分の空間が空いてしまうため、接触点の推定が困難であることを示し、2種類のロボットの場合でそれぞれ異なる走行理論を示した。螺旋駆動型配管検査ロボットでは、屈曲位置やローターの腕の長さによって拘束される空間が変化することを示し、3モジュール型配管検査ロボットでは、伸縮機構の腕の長さによらず、旋回動作を行える手法を示した。

第4章「配管検査ロボットの設計」では、開発した螺旋駆動型配管検査ロボットと3モジュール型配管検査ロボットの基本構造を示し、第3章で求めた曲管内及びT字管内走行の基礎理論に基づく設計方法について解説した。螺旋駆動型配管検査

ロボットの屈曲動作を実現するために、マイタギアを2つ組み合わせた差動駆動による新しい経路選択機構を提案した。また、ローターは曲管内で伸縮を繰り返しながら回転しなければならないため、バネの剛性や変位を大きくすると、その分大きなトルクが必要になることを示した。一方、3モジュール型配管検査ロボットは伸縮機構によって障害物適応性が下がる問題があったため、移動が妨げられると受動的に形状を変えて適応動作を行う劣駆動平行四辺形クローラと呼ばれる新しい機構を提案した。

第5章「曲管内走行実験」では、螺旋駆動型配管検査ロボットと3モジュール型配管検査ロボットの曲管内における走破性の検証実験を行った。いずれの場合も走行は可能であったが、螺旋駆動型配管検査ロボットでは、4章の設計で求めたバネの剛性や変位の影響を実験により検証し、3モジュール型配管検査ロボットでは、第3章の結果に基づいて3つのモジュールを制御する場合とそうでない場合の走行性能の比較を行った。

第6章「T字管内走行実験」では、2種類の実機を用いてT字管内における走破性検証実験を行った。螺旋駆動型配管検査ロボットの実験では高い走破性を示すことができたが、3モジュール型配管検査ロボットの実験では多くの課題が残った。

7.2 今後の課題

配管検査ロボットの研究を行うにあたり、今後さらに検討が必要なものを配管検査ロボット共通の課題、螺旋駆動型配管検査ロボットの課題、3モジュール型配管検査ロボットの課題として以下に挙げる。

7.2.1 配管検査ロボット共通の課題

ビジョンシステムとの融合

配管検査ロボットの最も重要な役割は配管内を自由に移動することであるが、一方で、配管内の状況を視覚的に確認し、問題のある場所を特定することも大きな役割となっている。そのため、ロボットの現在地の把握や配管の形状認識、マッピングシステム等も今後考慮していかなければならない重要なテーマとなっている。これまで、全方位カメラを用いた自己姿勢推定法 [34]、ドット状のレーザー反射光を用いた配管の形状認識 [35]、魚眼レンズを用いた配管内マッピングシステム [36]、等々が提案されているが、これらのシステムをロボットに搭載したときの制約も考慮する必要がある。

垂直配管内における走破性

本論文の実験はすべて水平状態で行ったものであり、実際の配管を考慮すると不十分である。予備実験として行った結果からは、螺旋駆動型配管検査ロボットも3モジュール型配管検査ロボットも図7.1や図7.2に示すように垂直の曲管内では走行可能であったが、垂直のT字管内ではいずれの場合も走行不可能であった。考えら

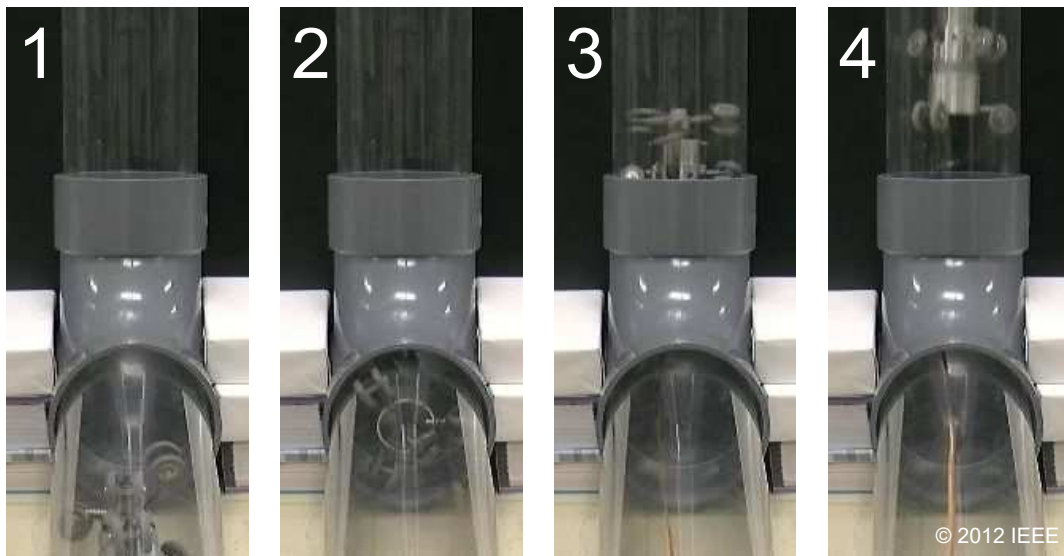


図 7.1: Experimental sequence of the screw-driving pipe inspection robot in a vertically positioned bend pipe

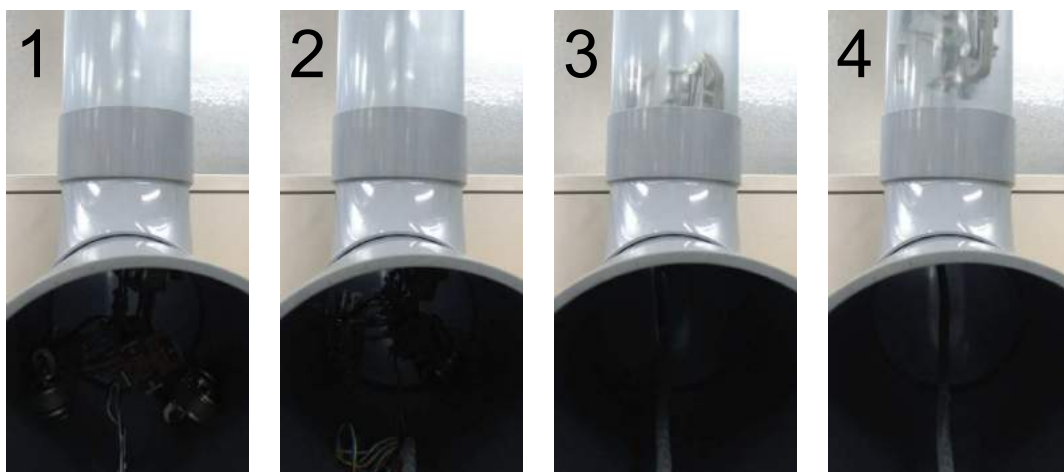


図 7.2: Experimental sequence of the three modular pipe inspection robot in a vertically positioned bend pipe

れる原因として、いずれの場合もロボットが落下してしまい、進むべき垂直直管内に駆動部を移動させられなかったことが挙げられる。これを解決する方法の1つに複数の駆動ユニットを用いて後方から落下を防ぐ方法が既に提案されている [20] が、前後の複数の駆動モジュールを常に協調制御する必要があるため、操作手順が煩雑になる傾向がある。そのため、垂直 T 字管内でいかに簡単な機構や制御で駆動部を支えながら次の直管内へ移動するかが配管検査ロボットの大きな課題となっている。

7.2.2 螺旋駆動型配管検査ロボットの課題

小型軽量化の問題

螺旋駆動型配管検査ロボットは小型軽量化を行い易く、最小で直径 30 [mm] 以下まで縮めることができる [33]。しかし、これはローターの回転の 1 自由度のみの場合であり、曲管の形状を利用した方向転換は可能であるが、T 字管内では能動的に方向を指定するための機構が必要となる。これにより、ロボット全体の大きさが大型化してしまい、螺旋駆動の本来の利点を失ってしまう可能性がある。そのため、この能動関節をいかに小さく軽くできるかが今後の大きな課題になると言える。これを解決する方法の1つとして、配管は細長い筒状のため、「半径方向には空間的に制約されるが進行方向に対してはあまり制約されない」という特徴を活かした方法が有効であると考えられる。例えば、ワイヤーとプーリーを組み合わせて駆動部後方から屈曲の動力を伝達すれば、ロボット本体の大型化を防ぐことができる。このような機構を取り入れれば螺旋駆動型が持つ利点を損なわずに機動性を高めることができる。

回収機能の必要性

配管内検査を終えたロボットは必ず配管外へ戻る必要があり、この過程で予期せぬトラブル等によりロボットが回収できなくなれば、致命的な問題となってしまう。螺旋駆動型配管検査ロボットはローターを逆回転させると後退することができるため、これを回収に用いることができる。しかし、キャスターの原理と同様に、後退時には車輪の傾きが回転する方向にモーメントがはたらくため、腕の軸に大きな負荷が加わる上、それぞれの車輪で発生する並進移動速度にばらつきが発生してしまう。また、曲管内や T 字管内の後退動作も困難である。これを解決する方法の1つに手動回収機構が挙げられる。例えば、螺旋駆動型配管検査ロボットはすべての車輪が受動車輪になっているという点もその大きな特徴となっており、これらを進行方向に揃えることができれば、ケーブルを人間が手動で引くことによって回収することができる。

7.2.3 3モジュール型配管検査ロボットの課題

本研究で開発した3モジュール型配管検査ロボットは T 字管内走行が不可能であった。そこで、ここでは考えられる最も大きな原因を駆動面積と伸縮機構の観点から述べる。

駆動面積の拡大

文献 [19] や [20] では、T字管内走行が可能であると報告されているが、本研究のものとの大きな違いの1つに駆動面積が挙げられる。本研究の3モジュール型配管検査ロボットは劣駆動平行四辺形クローラを実現するためにクローラ機構の両側面にモーターと前後同期のためのタイミングベルトを配置している。この両側面の部品が配管内壁面に接触してしまうと、駆動することができないため、推進力を失ってしまう。これを防ぐ最も簡単な手立は配管断面の円周に対する駆動面積をできるだけ大きくすることであり、モジュールの両側面にクローラ機構を配置することで駆動面積を増やす方法や文献 [23] で紹介されているようにモジュールの数を増やす方法が考えられる。しかし、駆動面積を増やすとロボットの伸縮範囲は小さくなるため、想定する配管の直径を考慮しながらいかにモジュールの設計を行うかも今後の課題となっている。

伸縮機構の改良

本研究で用いた3モジュール型配管検査ロボットの伸縮機構(パンタグラフ機構)は理論上伸縮の1自由度動作しか行わないはずであったが、実際には図4.14で示したようにモジュールの揺動現象が起こった。これはパンタグラフ機構の各リンクの軸と穴の機械誤差によるものと考えられ、この現象を防ぐことは不可能に近い。また、別の見方をすれば、この揺動現象のおかげで各モジュールは障害物に適應することができる、とも判断することができる。そのため、この問題を解決する例の1つとして、まず、旋回し易いようにできるだけロボットの全長を短くし、パンタグラフ機構にバネ等を用いて弾性を持たせる方法が考えられる。これにより、旋回中に一部のモジュールがT字管等の角に衝突したとしても、バネの復元力によって揺動動作を防ぐことができる。しかし、障害物に遭遇した際にはモジュールを揺動させた方が走破性は高くなるため、このバネをいかに最適な範囲で設計するかも今後の大きな課題となる。

謝辞

本論文は、筆者が立命館大学大学院理工学研究科機械システム専攻 生物知能機械学研究室 (馬研究室) において博士課程後期課程の期間に行った研究をまとめたものです。その間、常に熱心にご指導頂きました指導教官の馬書根教授に心より感謝申し上げます。研究内容から研究指針、研究生活に至るまで、貴重な助言を頂きました。先生との活発な議論を通して、本研究を幅広い視点から評価し直すことができました。

立命館大学工学部ロボティクス学科 特任教授 前田浩一先生には、研究室内のゼミに参加いただき、活発な議論を通して様々な助言をいただきました。立命館大学工学部ロボティクス学科 教授 野方誠先生、ならびに立命館大学工学部ロボティクス学科 准教授 小澤隆太先生には、合同ゼミにて大変お世話になりました。先生方から時に厳しく鋭い質問をしていただくことで、研究についてより深く考えることができました。心より感謝申し上げます。

東京工業大学 名誉教授 広瀬茂男先生 (株式会社ハイボット) には週一度の定例ミーティングにて大変お世話になりました。広瀬先生には自身の長年の経験に基づいたロボット創造設計における重要なポイントだけでなく、研究者や技術者としてのものづくりに対する姿勢や考え方等についてもご教授いただきました。心より感謝申し上げます。

本論文をまとめるにあたり、副査をお引き受けくださいました、立命館大学工学部ロボティクス学科 教授 川村貞夫先生、ならびに立命館大学工学部ロボティクス学科 教授 平井慎一先生に、心より感謝申し上げます。川村先生には、研究内容だけでなく将来の研究方針についても相談にのっていただきました。

立命館大学工作センター職員 弓山都志夫氏、山植肇氏、杉本弘之氏、永山幸一郎氏、浅田敬司氏には部品加工において大変お世話になりました。工作機械全般の取り扱い方法を丁寧に教えていただいただけでなく、難しく面倒な加工であっても親身になって相談にのっていただきました。心より感謝申し上げます。

在学中に多岐に渡り指導・協力頂いた生物知能機械学研究室卒業生の皆様、特に、全斉全氏 (中国ハルビン工業大学 講師)、呉曉東氏 (中国上海交通大学 助研)、孫翊氏 (立命館大学 専門研究員)、吉田佑氏 (コベルコ建機株式会社)、西村太貴氏 (株式会社島津製作所) に心より感謝申し上げます。

株式会社ヤスダハンズ 松田頼彦氏には博士課程後期課程在学中だけでなく、博士課程前期課程在学中から経済的にも精神的にも多大なるご支援をいただきました。工学的な側面からだけでなく、社会的あるいは経済学的な側面からも本研究を見つめ直すことができ、非常に刺激的で創造的な日々を過ごすことができました。また、松田裕子氏には、毎週末、時間もお金も無い筆者に対して温かく美味しい食事を用意していただきました。お二方に心より感謝申し上げます。

立命館大学科学技術振興会からは2013年度及び2014年度の奨学生として選ばれ、2年間の奨学金を給付いただきました。また、立命館大学からは博士課程後期課程研究奨励奨学金を2012年度にAを、2013年度にBを、2014年度にAを給付いただきました。立命館大学の皆様、立命館大学科学技術振興会ならびに当会の会員の皆様に心より感謝申し上げます。

最後に、役に立つかどうかもわからないような研究に打ち込む筆者を理解し、支えてくれた家族に心より感謝申し上げます。

2015年3月

参考文献

- [1] <http://www.aeye.jp/works/rt/pipe>
- [2] 国土交通省 道路局 国道・防災課：“附属物(標識, 照明施設等)点検要領 付録一 3：超音波厚さ計による板厚調査の実施手順”，2014.
- [3] 嶋崎 直：“高速化を実現する原油配管の超音波非破壊検査ロボット—関西エックス線”，機械設計(日刊工業新聞社)，vol. 55, no. 12, pp. 48–51, 2011.
- [4] A. A. Carvalho, J. M. A. Rebello, L. V. S. Sagrilo, C. S. Camerini and I. V. J. Miranda: “MFL Signals and Artificial Neural Networks Applied to Detection and Classification of Pipe Weld Defects”, *NDT & E International*, vol. 39, pp. 661–667, 2006.
- [5] A. Zagler and F. Pfeiffer: ““MORITZ” a Pipe Crawler for Tube Junctions”, *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2954–2959, 2003.
- [6] T. Yanagida, K. Adachi and T. Nakamura: “Development of Bellows-Type Artificial Rubber Muscle and Application to Peristaltic Crawling Endoscopic Robot”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 25, no. 4, pp. 748–754, 2013.
- [7] A. Kuwada, Y. Adomi, K. Suzumori, T. Kanda, S. Wakimoto and N. Kadowaki: “Snake-like Robot Negotiating Three-Dimensional Pipelines”, *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 989–994, 2007.
- [8] 宮川 豊美, 鈴森 康一, 木村 正信, 長谷川 幸久：“1 インチ用配管作業ロボットの開発”，日本ロボット学会誌，vol. 17, no. 3, pp. 389–395, 1999.
- [9] 宮川 豊美：“遊星歯車式管径追従車輪走行機構よる小口径管内移動作業ロボットに関する研究”，東京工業大学電子図書館学位論文データベース，2008.
- [10] H. R. Choi and S. M. Ryew: “Robotic System with Active Steering Capability for Internal Inspection of Urban Gas Pipelines”, *Mechatronics*, vol. 12, pp. 713–736, 2002.
- [11] M. Horodincu, I. Doroftei, E. Mignon and A. Preumont: “A Simple Architecture for In-pipe Inspection Robots”, *Proceeding of the International Colloquium on Autonomous and Mobile Systems*, pp. 61–64, 2002.

- [12] S. Hirose, H. Ohno, T. Mitsui and K. Suyama: “Design of In-pipe Inspection Vehicles for $\phi 25$, $\phi 50$, $\phi 150$ Pipes”, *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2309–2314, 1999.
- [13] 磯村 一樹, 広瀬 茂男: “連結球形車輪型管内移動ロボット「ThesV」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 2011 講演論文集, pp. 2A2-L08, 2011.
- [14] 磯村 一樹, M. Guarnieri, P. Debenest, 鷹巣 征行, 広瀬 茂男: “連結球形車輪型管内移動ロボット「ThesV」の開発 —第2報: 機構改良と配管腐食検査の総合実験—”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 講演論文集, pp. 2A2-M02, 2012.
- [15] S. A. Fjerdingen, P. Liljeback and A. A. Transeth: “A Snake-like Robot for Internal Inspection of Complex Pipe Structures”, *Proceeding of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5665–5671, 2009.
- [16] E. Dertien, S. Stramigioli and K. Pulles: “Development of an Inspection Robot for Small Diameter Gas Distribution Mains”, *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 5044–5049, 2011.
- [17] E. Dertien: “Design of an Inspection Robot for Small Diameter Gas Distribution Mains”, *PhD Thesis, University of Twente*, 2014.
- [18] S. Roh and H. R. Choi: “Differential-Drive In-Pipe Robot for Moving Inside Urban Gas Pipelines”, *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 21, no. 1, pp. 1–17, 2005.
- [19] S. Roh, D. W. Kim, J. S. Lee, H. Moon and H. R. Choi: “In-pipe Robot Based on Selective Drive Mechanism”, *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 105–112, 2009.
- [20] Y. S. Kwon and B. J. Yi: “Design and Motion Planning of a Two-Module Collaborative Indoor Pipeline Inspection Robot”, *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 28, no. 3, pp. 681–696, 2012.
- [21] J. Park, D. Hyun, W. H. Cho, T. H. Kim and H. S. Yang: “Normal Force Control for an In-Pipe Robot According to the Inclination of Pipelines”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 12, pp. 5304–5310, 2011.
- [22] <http://www.inuktun.com/crawler-vehicles/versatrax-vertical-crawler.html>
- [23] J. H. Kim: “FAMPER: A Fully Autonomous Mobile Robot for Pipeline Exploration”, *Proceeding of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, pp. 517–523, 2010.
- [24] <http://www.endocontrol.de/english/roboter.html>

- [25] 仇 時雨, 牧野 洋: “クロソイド補間によるコーナ軌跡制御”, 精密工学会誌, vol. 56, no. 7, pp. 1268–1273, 1990.
- [26] 高倉 葉子: 数値計算の基礎 —解法と誤差—. コロナ社, 2007.
- [27] Y. Liu and G. Liu,: “Track-Stair Interaction Analysis and Online Tipover Prediction for a Self-Reconfigurable Tracked Mobile Robot Climbing Stairs”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 14, no. 5, pp. 528–538, 2009.
- [28] C. Ye, G. Lv, S. Ma and H. Ni: “Development of a Variable Parallelogram Tracked Mobile Robot”, *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 2156–2160, 2012.
- [29] Q. Quan and S. Ma: “Development of a Modular Crawler for Tracked Robots”, *International Journal of Advanced Robotics*, vol. 25, no. 13/14, pp. 1839–1849, 2011.
- [30] B. Kim, Q. Vu, J. Song and C. Yim: “Novel Design of a Small Field Robot with Multi-active Crawlers Capable of Autonomous Stair Climbing”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 24, no. 1, pp. 343–350, 2010.
- [31] Z. Li, S. Ma, B. Li, M. Wang and Y. Wang: “Design and Basic Experiments of a Transformable Wheel-Track Robot with Self-adaptive Mobile Mechanism”, *Proceeding of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1334–1339, 2010.
- [32] G. Lan, S. Ma, K. Inoue and Y. Hamamatsu: “Development of a Novel Crawler Mechanism with Polymorphic Locomotion”, *International Journal of Advanced Robotics*, vol. 21, no. 3/4, pp. 421–440, 2007.
- [33] I. Hayashi, N. Iwatsuki and S. Iwashina: “The Running Characteristics of a Screw-Principle Microrobot in a Small Bent Pipe”, *International Symposium on Micro Machine and Human Science*, pp. 225–228, 1995.
- [34] J. Kim, M. Muramatsu, Y. Murata and Y. Suga: “Omnidirectional Vision-based Ego-pose Estimation for an Autonomous In-pipe Mobile Robot”, *International Journal of Advanced Robotics*, vol. 21, no. 3/4, pp. 441–460, 2007.
- [35] T. Tsubouchi, S. Takaki, Y. Kawaguchi and S. Yuta: “A Straight Pipe Observation from the Inside by Laser Spot Array and a TV camera”, *Proceeding of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 82–87, 2000.
- [36] P. Hansen, H. Alismail, P. Rander and B. Browning: “Pipe Mapping with Monocular Fisheye Imagery”, *Proceeding of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5180–5185, 2013.

研究業績

学術誌

- [1] Atsushi Kakogawa, Taiki Nishimura and Shugen Ma: Designing Arm Length of a Screw Drive In-pipe Robot for Climbing Vertically Positioned Bent Pipes. *Robotica*, Published online, 2014.
- [2] Taiki Nishimura, Atsushi Kakogawa and Shugen Ma: Improvement of a Screw Drive In-Pipe Robot with Pathway Selection Mechanism to Pass Through T-Branched. *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 25, No.2, 2013.
- [3] Atsushi Kakogawa and Shugen Ma: Stiffness Design of Springs for a Screw Drive In-pipe Robot to Pass through Curved Pipes and Vertical Straight Pipes. *International Journal of Advanced Robotics*, vol. 26, No.1, 2012.

査読付き国際会議

- [1] Atsushi Kakogawa and Shugen Ma: “Speed Analysis of Three Driving Modules for an In-pipe Inspection Robot to Pass through a Bent Pipe,” *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Bali, Indonesia, pp. 1731–1736, 2014.
- [2] Atsushi Kakogawa, Shugen Ma and Shigeo Hirose: “An In-pipe Robot with Underactuated Parallelogram Crawler Modules,” *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Hong Kong, China, pp. 1687–1692, 2014.
- [3] Atsushi Kakogawa and Shugen Ma: “Design of an Underactuated Parallelogram Crawler Module for an In-pipe Robot,” *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Shenzhen, China, pp. 1324–1329, 2013.
- [4] Atsushi Kakogawa, Taiki Nishimura and Shugen Ma: “Development of a Screw Drive In-pipe Robot for Passing through Bent and Branch Pipes,” *Proceeding of the International Symposium on Robotics*, Seoul, Korea, pp. P-06, 2013.
- [5] Taiki Nishimura, Atsushi Kakogawa and Shugen Ma: “Pathway Selection Mechanism of a Screw Drive In-pipe Robot in T-branches,” *Proceeding of the IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, Seoul, Korea, pp. 612–617, 2012.

- [6] Atsushi Kakogawa and Shugen Ma: “Experimental Verification of Analytical Torques Enabling a Screw Drive In-pipe Robot to Pass through Bent Pipes,” *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Phuket, Thailand, pp. 1742–1747, 2011.
- [7] Atsushi Kakogawa and Shugen Ma: “Mobility of an In-pipe Robot with Screw Drive Mechanism inside Curved Pipes,” *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Tianjin, China, pp. 1530–1535, 2010.

その他口頭発表

- [1] Atsushi Kakogawa and Shugen Ma: “An In-pipe Inspection Robot with Underactuated Parallelogram Crawler Modules,” *The 7th Vietnamese-Japanese Student’s Scientific Exchange Meeting*, Kobe University, Hyogo, 2014.
- [2] 加古川 篤: “管内走行ロボットの研究開発,” 関西ネットワークシステム (KNS) 第45回定例会, 立命館大学, 滋賀, 2014.
- [3] 加古川 篤, 馬 書根: “劣駆動平行四辺形クローラ機構を有する3モジュール型配管検査ロボット,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2014 講演論文集, 富山市総合体育館, 富山, 1P1-A05, 2014.
- [4] Atsushi Kakogawa and Shugen Ma: “In-pipe Robot with Underactuated Parallelogram Crawler Modules,” *5th International Workshop for Young Robotics Researchers*, Nanyang Technological University, Singapore, 2014.
- [5] 西村 太貴, 加古川 篤, 馬 書根: “経路選択可能な螺旋駆動型管内移動ロボットの機構改良,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2013 講演論文集, つくば国際会議場, 茨城, 1A1-R01, 2013.
- [6] Atsushi Kakogawa and Shugen Ma: “Steerability Analysis of a Screw Drive In-pipe Robot with Pathway Selection Mechanism at a T-branch,” *The Workshop on Advanced Mechatronics*, 立命館大学, 滋賀, 2013.
- [7] 西村 太貴, 加古川 篤, 馬 書根: “経路選択可能な螺旋駆動型管内移動ロボットの開発,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2012 講演論文集, アクトシティ浜松, 静岡, 2P1-L09, 2012.
- [8] Atsushi Kakogawa and Shugen Ma: “Mobility Analysis for a Screw Drive In-pipe Robot to Pass in Bent Pipes,” *China-Japan Symposium on Advanced Robotics*, Ritsumeikan University, Shiga, 2012.
- [9] Atsushi Kakogawa and Shugen Ma: “Mobility of a Screw Drive In-pipe Robot in Bent Pipes,” *ShU-RitsU Joint Workshop on Field Robotics*, Shanghai University, Shanghai, China, 2011.

- [10] 加古川 篤, 馬 書根: “螺旋駆動型管内移動ロボットの曲管内走行時のトルク解析とその検証実験行,” 第 29 回日本ロボット学会学術講演会 講演論文集, 芝浦工業大学, 東京, 2011.
- [12] 加古川 篤, 馬 書根: “曲管内走行可能な螺旋駆動型管内移動ロボットのための最適なバネ定数の設計,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011 講演論文集, 岡山コンベンションセンター, 岡山, 2A1-K10, 2011.
- [13] Atsushi Kakogawa and Shugen Ma: “Development of a Pipe-Inspection Robot with Screw Drive Mechanism for Curved Pipes,” *2010 RITSUMEIKAN-SIA Students Joint Symposium on Robotics and Biomimetics*, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, China, 2010.
- [14] 加古川 篤, 馬 書根: “螺旋駆動型管内移動ロボットの曲管内走行,” 第 28 回日本ロボット学会学術講演会 講演論文集, 名古屋工業大学, 愛知, 2010.

賞罰

- [1] Best Presentation Award (上記その他口頭発表 [1] に対して), 2014.
- [2] 2013 年度立命館大学博士研究発表会 優秀賞, 2014.
- [3] Best Paper Award (上記査読付き国際会議 [4] に対して), 2013.

特許

- [1] 馬 書根, 加古川 篤: “管内走行装置,” 2014-106963 (申請中), 2014.

本論文に関係しない論文・発表

- [1] Takahiro Matsuno, Dingxin Ge, Shugen Ma and Atsushi Kakogawa: “Study on Air Inflow of a Passive Suction Cup,” *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Shenzhen, China, pp. 1324–1329, 2013.
- [2] Takahiro Matsuno, Atsushi Kakogawa and Shugen Ma: “Development of a Suction Cup with a Disc Spring,” *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Karlsruhe, Germany, pp. 1354–1359, 2013.
- [3] Hiroyuki Nishimura, Atsushi Kakogawa and Shugen Ma: “Development of an Underactuated Robot Gripper Capable of Retracting Motion,” *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Guangzhou, China, pp. 2161–2166, 2012.

付録 A

モーターのPID角度制御

ここでは、第5章で用いたモーターのPID角度制御について解説する。

A.1 ブロック線図

図 A.1 に本研究で用いたPID角度制御系のブロック線図を示す。 $\theta_d(t)$ 及び $\theta_r(t)$ はそれぞれ目標入力角度とエンコーダーから取得される実際の角度を表しており、 K_p , K_i , K_d はそれぞれ比例ゲイン、積分ゲイン、微分ゲインを意味している。 $e(t)$ は目標値と実際の値の偏差を表し、以下の式で表される。

$$e(t) = \theta_d(t) - \theta_r(t) \quad (\text{A.1})$$

このとき、操作量を $m(t)$ とすると制御則は以下のようになり、これをPWM指令値としてモーターに入力している。

$$m(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(s) ds + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (\text{A.2})$$

なお、Arduino Nano のPWMは8bit となっているため、デューティ比の設定は0から255までとし、PIC16F88 のPWMは10bit となっているため、デューティ比の設定は0から1023までとした。

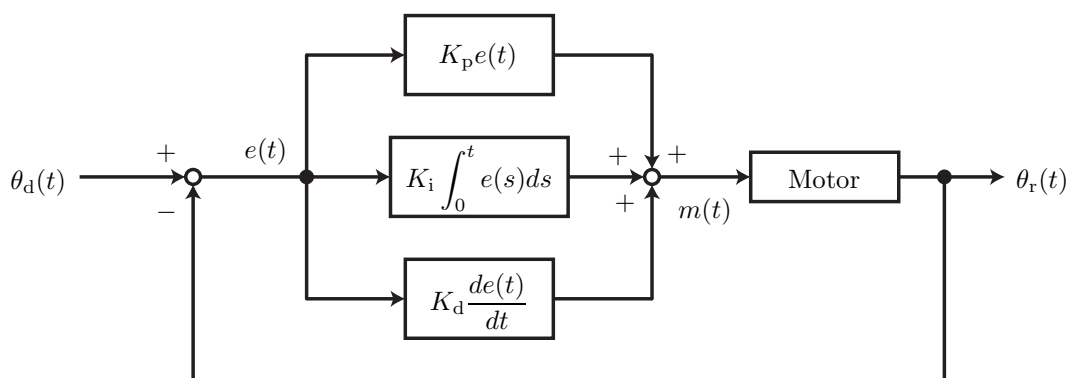


図 A.1: PID block diagram for angle control of the motor

A.2 電子回路

図 A.2 に PIC16F88 用 (螺旋駆動型配管検査ロボット) の電子回路を, 図 A.3 に Arduino Nano 用 (3 モジュール型配管検査ロボット) の電子回路をそれぞれ示す. また, これらの配線図を図 A.4 及び図 A.5 にそれぞれ示す.

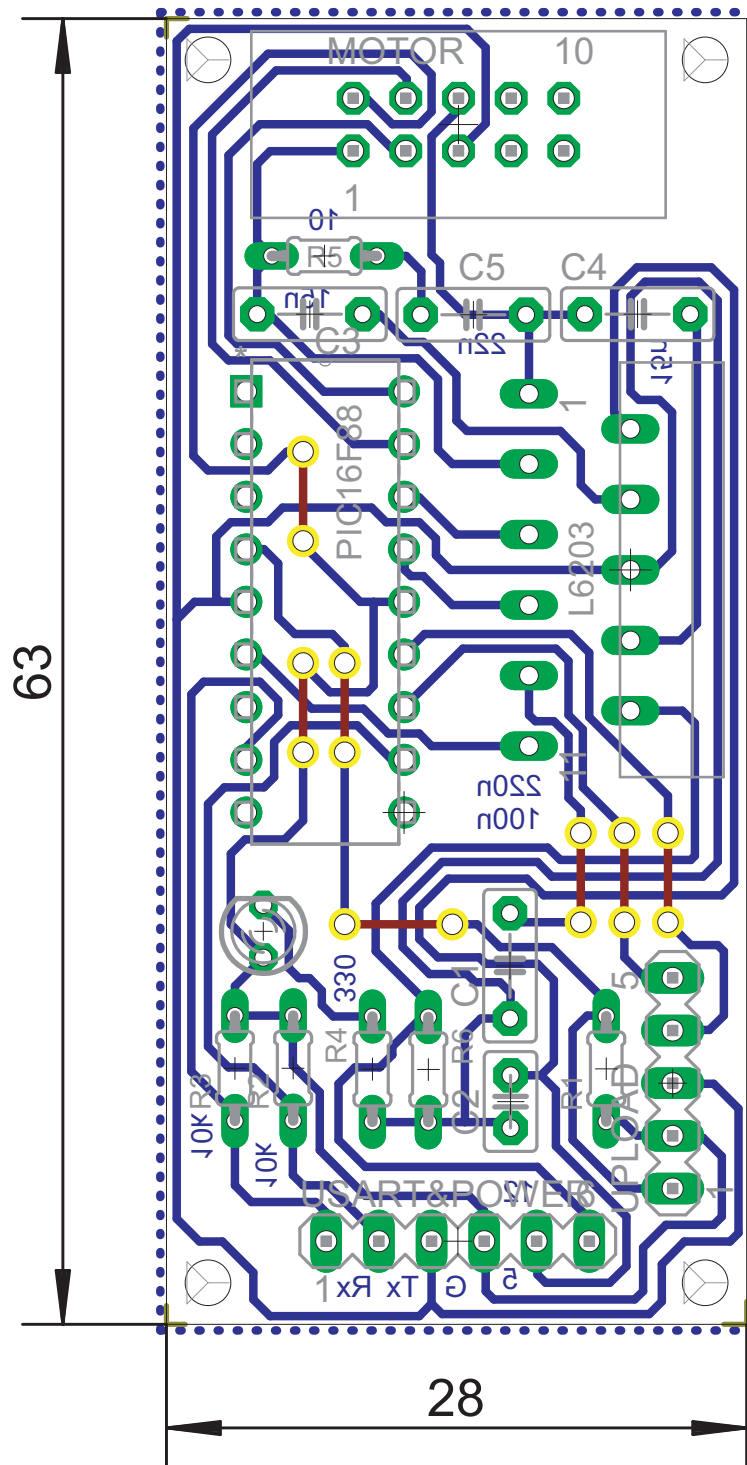


図 A.2: Circuit for the PIC16F88

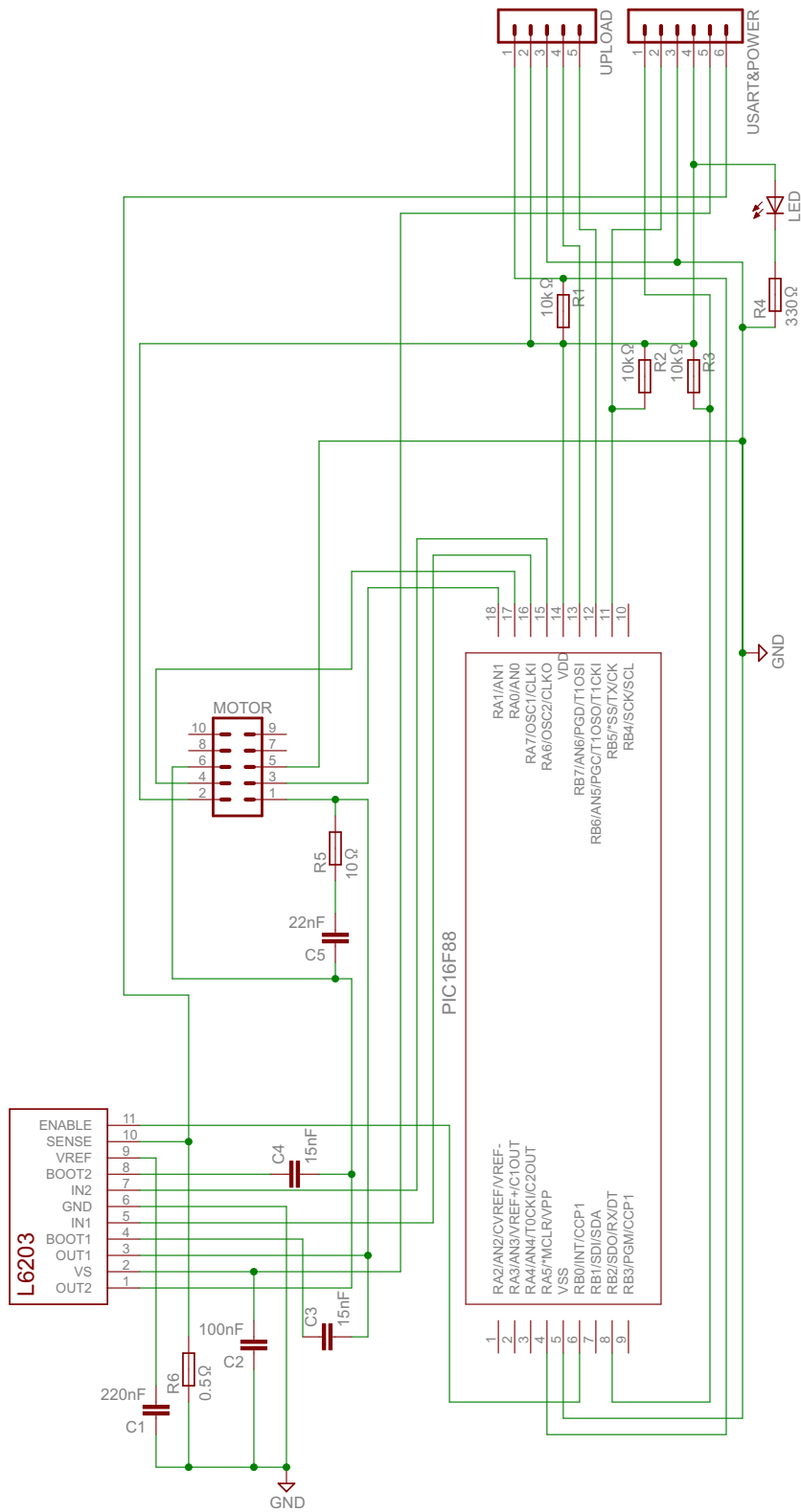


図 A.4: Wiring diagram for the PIC16F88

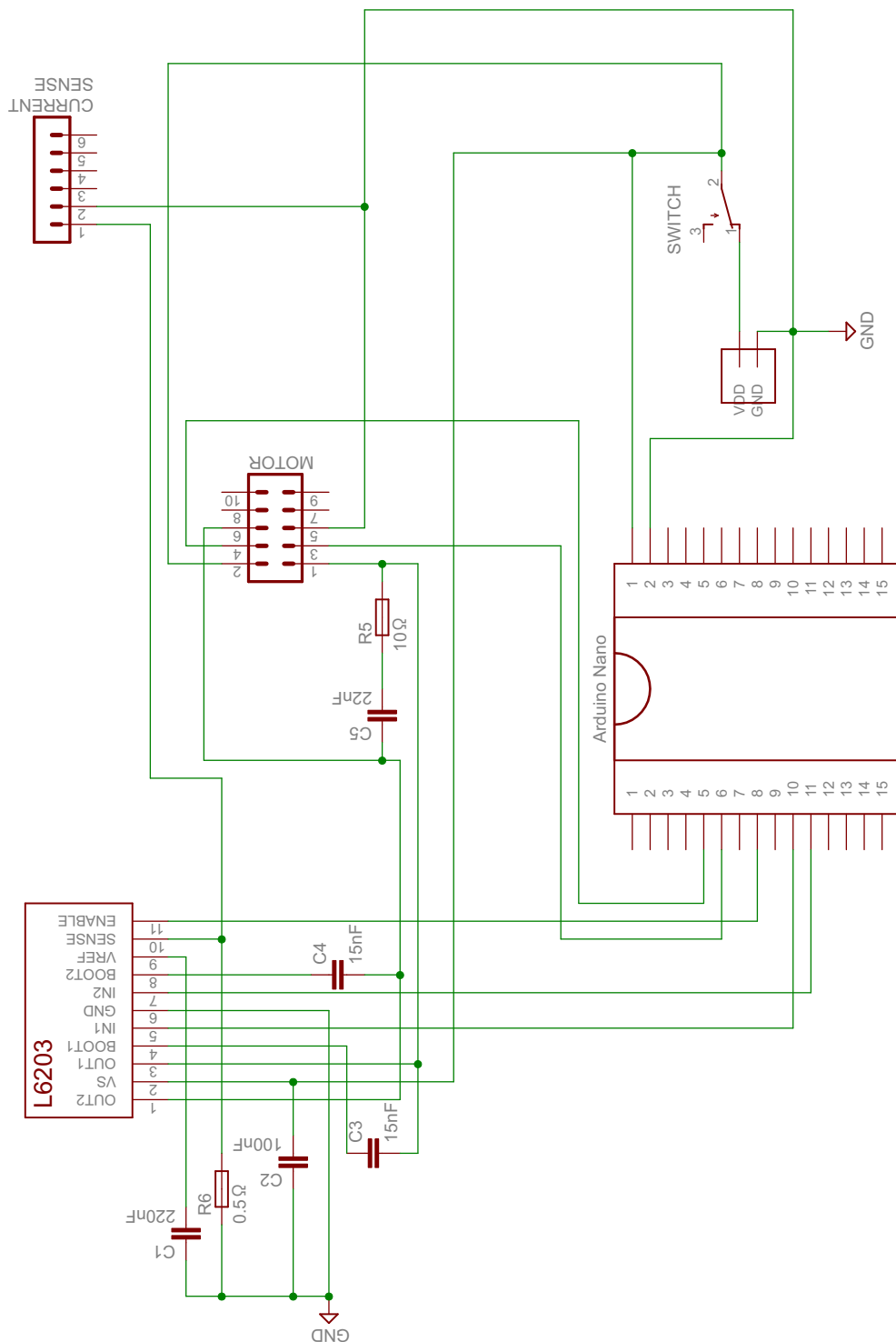


図 A.5: Wiring diagram for the Arduino Nano

付録B

モーターのトルク定数の計測

ここでは、モーターの仕様書に記載されているトルク定数の値を実験により確認する。

B.1 実験装置

図B.1に実験装置を示す。ローターには釣り糸が取り付けられており、その端が0.1 [kg] 単位まで計測可能なはかりにつながっている。ここでモーターに10 [deg/sec] の非常に遅い定速度を与え、ローターの腕と釣り糸の直角状態を維持しながら停動トルクを計測する。また、同時に電流を計測し、以下の式を用いてトルク定数を算出する。 K_τ , τ_s , K_{ratio} , i はそれぞれトルク定数、停動トルク、減速比、電流値を示している。

$$K_\tau = \frac{\tau_s}{K_{\text{ratio}} i} \quad (\text{B.1})$$

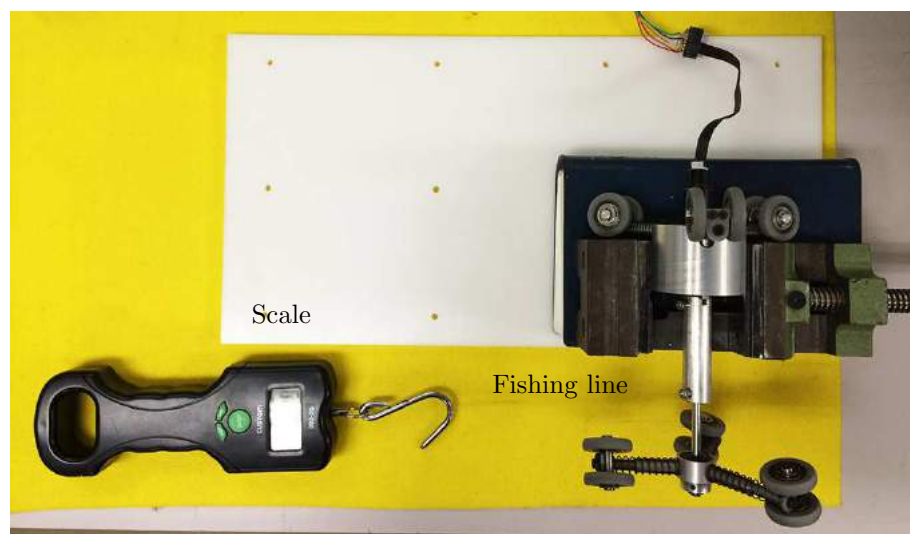


図 B.1: A device for measuring the torque coefficient of the motor

B.2 計測結果

計測結果から、ローターの回転が止まっている状態で、はかりの値は0.57 [kg] となった。これは約 5.59 [N] に相当する。ローターの中心から釣り糸までの距離は 60 [mm] であるため、モーターで発生している停動トルクは約 335.4 [Nmm] となる。また、このときの電流値は図 B.2 に示すような値となり、平均値は 1.92 [A] となった。減速比をモーターに取り付けられているギアヘッドと同じ 24 とすると、トルク定数は $K_t = 7.28$ [Nmm/A] となった。仕様書の値は 8.11 [Nmm/A] であるため、実際は約 1.0 [Nmm/A] 程度小さい値となった。これにはギアヘッドによる効率低下や計測誤差などが原因として考えられる。

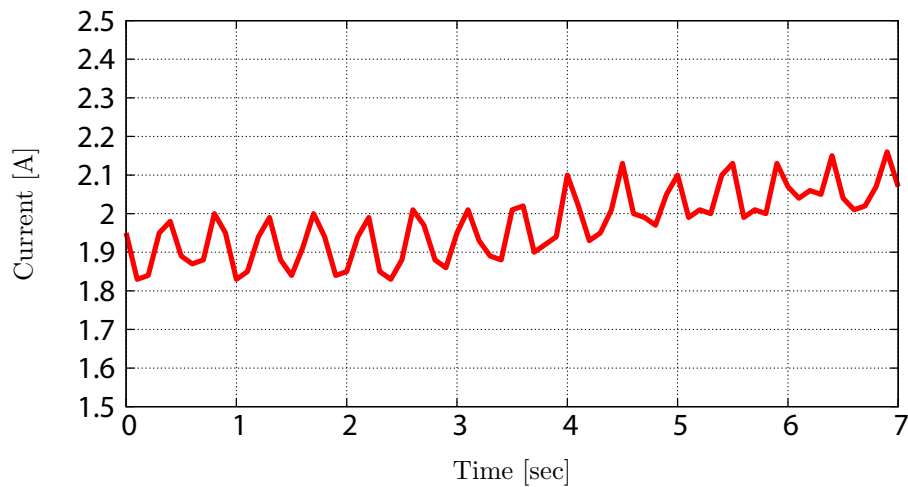


図 B.2: Current when the rotator is stopped

付録C 引用図表

図 1.1 : <http://www.aeye.jp/works/rt/pipe>

図 1.2 (a) : <http://www.contractresources.com/showcase/major-projects/intelligent-pigging-for-mobil-and-origin-energy/>

図 1.2 (b) : <http://j-scope.com/>

図 1.3 : <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/365/1850/109>

図 1.4 : 参考文献 [6]

図 1.5 : <https://kaken.nii.ac.jp/pdf/2009/seika/mext/15301/16078209seika.pdf>

図 1.8 : 参考文献 [9]

図 1.9 : <http://shb.skku.edu/irms/>

図 1.10 : <http://scmero.ulb.ac.be/>

図 1.11 : <http://www-robot.mes.titech.ac.jp/>

図 1.12 : 参考文献 [14]

図 1.13 : 参考文献 [15]

図 1.14 : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5980253

図 1.15 (a) : <http://shb.skku.edu/irms/>

図 1.15 (b) : <http://shb.skku.edu/irms/>

図 1.16 : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4406991

図 1.17 : 参考文献 [21]

図 1.18 : <http://www.inuktun.com/crawler-vehicles/versatrax-vertical-crawler.html>

図 1.19 : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5431967

図 1.20 : <http://www.endocontrol.de/>

- © 2014 IEEE. Reprinted, with permission, from Atsushi Kakogawa and Shugen Ma, Speed Analysis of Three Driving Modules for an In-pipe Inspection Robot to Pass through a Bent Pipe, Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 12/2014.
- © 2014 IEEE. Reprinted, with permission, from Atsushi Kakogawa, Shugen Ma and Shigeo Hirose, An In-pipe Robot with Underactuated Parallelogram Crawler Modules, Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 06/2014.
- © 2013 IEEE. Reprinted, with permission, from Atsushi Kakogawa and Shugen Ma, Design of an Underactuated Parallelogram Crawler Module for an In-pipe Robot, Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 12/2013.
- © 2013 IEEE. Reprinted, with permission, from Atsushi Kakogawa, Taiki Nishimura and Shugen Ma, Development of a Screw Drive In-pipe Robot for Passing through Bent and Branch Pipes, Proceeding of the International Symposium on Robotics, 10/2013.
- © 2012 IEEE. Reprinted, with permission, from Taiki Nishimura, Atsushi Kakogawa and Shugen Ma, Pathway Selection Mechanism of a Screw Drive In-pipe Robot in T-branches, Proceeding of the IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, 08/2012.
- © 2011 IEEE. Reprinted, with permission, from Atsushi Kakogawa and Shugen Ma, Experimental Verification of Analytical Torques Enabling a Screw Drive In-pipe Robot to Pass through Bent Pipes, Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 12/2011.
- © 2010 IEEE. Reprinted, with permission, from Atsushi Kakogawa and Shugen Ma, Mobility of an In-pipe Robot with Screw Drive Mechanism inside Curved Pipes, Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 12/2010.

This thesis is derived, in part, from an article published by Taylor & Francis in *Advanced Robotics* on 2012 available online:

<http://www.tandfonline.com/10.1163/156855311X614554>.