

論文 / 著書情報
Article / Book Information

| | |
|-------------------|---|
| 題目(和文) | アームを搭載したクローラ型移動作業ロボットの手首機能と遠隔操作性向上に関する研究 |
| Title(English) | |
| 著者(和文) | 上田 紘司 |
| Author(English) | Koji Ueda |
| 出典(和文) | 学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9099号, 授与年月日:2013年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:廣瀬 茂男 |
| Citation(English) | Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9099号, Conferred date:2013/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner: |
| 学位種別(和文) | 博士論文 |
| Type(English) | Doctoral Thesis |

平成 24 年度 学位論文

アームを搭載したクローラ型移動作業ロボットの
手首機能と遠隔操作性向上に関する研究

東京工業大学 大学院理工学研究科 機械宇宙システム専攻

上田 紘司

目次

| | |
|---|----|
| 第 1 章 序論 | 1 |
| 1.1 本研究の背景 | 1 |
| 1.2 本研究の目的 | 1 |
| 1.3 本論文の構成 | 2 |
| 第 2 章 アームを搭載したクローラ型移動作業ロボット HELIOS IX | 3 |
| 2.1 移動作業ロボット | 3 |
| 2.2 HELIOS シリーズ | 4 |
| 2.3 HELIOS IX の要求仕様 | 6 |
| 2.4 HELIOS IX の設計方針 | 8 |
| 2.5 まとめ | 9 |
| 第 3 章 HELIOS IX の手首機構 | 10 |
| 3.1 手首機構の設計に関する考察 | 10 |
| 3.2 従来の手首機構 | 10 |
| 3.3 2-DoF Spherical Parallel (2DSP) 機構の提案とその基本運動学解析 | 13 |
| 3.4 可動範囲とその最大化 | 18 |
| 3.5 2DSP 機構の受動対偶の構成法 | 23 |
| 3.6 まとめ | 33 |
| 第 4 章 HELIOS IX の力センサとそれを用いた力制御 | 34 |
| 4.1 力の計測方法の考察 | 34 |
| 4.2 起歪体を用いた多軸力センサの測定範囲の補正方法の提案 | 37 |
| 4.3 力制御方法の検討 | 40 |
| 4.4 まとめ | 42 |
| 第 5 章 HELIOS IX のクローラ移動性能の向上 | 44 |
| 5.1 そり | 44 |
| 5.2 対地適応動作 | 44 |
| 5.3 まとめ | 47 |

| | | |
|--------------|------------------------------------|-----------|
| 第 6 章 | HELIOS IX の全体設計と開発 | 49 |
| 6.1 | HELIOS IX の全景 | 49 |
| 6.2 | クローラ・ユニット | 49 |
| 6.3 | 作業アーム | 50 |
| 6.4 | カメラアーム | 50 |
| 6.5 | 手首機構 | 51 |
| 6.6 | グリップ | 59 |
| 6.7 | システム構成 | 60 |
| 6.8 | まとめ | 60 |
| 第 7 章 | Shared Autonomy 型遠隔操作系 | 61 |
| 7.1 | Shared Autonomy | 61 |
| 7.2 | 手動操縦方法 | 62 |
| 7.3 | 3D 情報を用いた操作系の導入 | 66 |
| 7.4 | その他の操作補助 | 74 |
| 7.5 | まとめ | 76 |
| 第 8 章 | HELIOS IX の性能評価と動作試験 | 77 |
| 8.1 | 移動性能 | 77 |
| 8.2 | 作業性能 | 83 |
| 8.3 | ドアの通り抜け実験 | 86 |
| 8.4 | まとめ | 89 |
| 第 9 章 | 結論と今後の課題 | 92 |
| 9.1 | 結論 | 92 |
| 9.2 | 今後の課題 | 93 |
| 付録 A | アームの運動学 | 94 |
| A.1 | 一次試作手首機構を装備したアームの逆運動学 | 94 |
| A.2 | 新しい手首機構を装備したアームの逆運動学 | 96 |
| 付録 B | 手首機構を空間リンク機構としてとらえたときの運動学解析 | 97 |
| 付録 C | 自立移動ロボット Mole I の開発 | 99 |
| C.1 | 目的 | 99 |
| C.2 | ハードウェアの構成 | 100 |
| C.3 | ナビゲーション方法 | 101 |

| | |
|--------------------|-----|
| C.4 走行実験 | 102 |
| C.5 おわりに | 104 |
| 参考文献 | 106 |

目 次

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | PackBot 510 (iRobot) | 4 |
| 2.2 | Survey Runner (TOPY) | 4 |
| 2.3 | Quince (Chiba Institute of Technology, et al.) | 4 |
| 2.4 | UMRS 2007 (International Rescue System Institute, et al.) | 5 |
| 2.5 | RaBOT (Japan Atomic Energy Research Institute) | 5 |
| 2.6 | HELIOS concept motion capabilities | 6 |
| 2.7 | HELIOS VII (left) and HELIOS VIII (right) | 6 |
| 2.8 | HELIOS VIII- stairs climbing test | 7 |
| 3.1 | Operation to which large load acts on the wrist | 11 |
| 3.2 | Two DoF coupled drive ankle mechanism for walking robots | 13 |
| 3.3 | First model of wrist mechanism and actuation | 14 |
| 3.4 | Kinematic model of the wrist | 16 |
| 3.5 | Elements of Jacobi matrix. ($l_1 = 40^\circ$, $l_2 = 60^\circ$, $l_3 = 50^\circ$, $\alpha = 0^\circ$, $\forall \theta_{pitch}$) | 19 |
| 3.6 | Contour line. (a) Optimum range of θ_{yaw} [deg] (b) Optimum length of l_2 [deg]. | 20 |
| 3.7 | Kinematic model of 2DSP mechanism. | 21 |
| 3.8 | Left: input torque space. Right: Output torque space. | 21 |
| 3.9 | Optimum range of θ_{yaw} ($r_{\tau min} = 0$). | 23 |
| 3.10 | Optimum range of θ_{yaw} ($r_{\tau min} = 0$) ($l_1 = 42^\circ$, $l_2 = 81.9^\circ$, $l_3 = 50^\circ$, $\alpha = 80.1^\circ$). | 23 |
| 3.11 | r_τ : omni-directional maximum output torque. | 23 |
| 3.12 | Optimum range of θ_{yaw} ($r_{\tau min} = 0.5$). | 24 |
| 3.13 | Optimum range of θ_{yaw} ($r_{\tau min} = 0.5$) ($l_1 = 42^\circ$, $l_2 = 71.7^\circ$, $l_3 = 50^\circ$, $\alpha = 64^\circ$). | 24 |
| 3.14 | r_τ : omni-directional maximum output torque. | 24 |
| 3.15 | Example of revolute joint | 25 |
| 3.16 | Example of spherical 4-bar mechanisms | 26 |
| 3.17 | Spherical 6-link mechanisms | 27 |
| 3.18 | Force and torque applied on each joint. (right and left motor output: $ \tau_{mL} = \tau_{mR} = 1 \text{ Nm}$) | 30 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.19 | Applied force and torque on link C_L | 30 |
| 4.1 | Measuring wrist motors current. | 35 |
| 4.2 | Left: theoretical motor torque. Right: measured motor current. | 35 |
| 4.3 | Reinforced multi-axial force sensor with elastic plate | 37 |
| 4.4 | Adding a elastic plate | 38 |
| 4.5 | Developed elastic plate | 38 |
| 4.6 | Force sensor with elastic plate | 39 |
| 4.7 | Result of displacement analysis | 40 |
| 4.8 | Assembled force sensor and elastic plate | 41 |
| 4.9 | Outputs of the force sensor while exerting a force on each axis | 41 |
| 4.10 | Experiment of grasping objects | 43 |
| 4.11 | Force vector displayed in GUI | 43 |
| 5.1 | Sled | 45 |
| 5.2 | The configuration of the tracked vehicle HELIOS II using four equilibrium crawler | 46 |
| 5.3 | Definition of joint angle | 46 |
| 5.4 | Crawlers model connected with spring and damper | 46 |
| 5.5 | Angular and torque difference between left and right tracks are fed back. | 48 |
| 6.1 | Developed arm-equipped tracked vehicle HELIOS IX | 49 |
| 6.2 | Crawler unit | 50 |
| 6.3 | Main arm dimension | 51 |
| 6.4 | Detail of the camera arm | 52 |
| 6.5 | Developed wrist mechanism | 53 |
| 6.6 | Cross-section of the wrist mechanism | 53 |
| 6.7 | Wrist motion test | 54 |
| 6.8 | Pushing ground | 55 |
| 6.9 | Actual workspace of the wrist | 56 |
| 6.10 | Actual workspace of driver link | 56 |
| 6.11 | Wiring to the gripper | 57 |
| 6.12 | Initialization of angle of driving linkage | 58 |
| 6.13 | Calibration of link parameters | 58 |
| 6.14 | Developed 1 DoF gripper | 59 |
| 6.15 | HELIOS IX system architecture | 60 |

| | | |
|------|--|----|
| 7.1 | Input device controller | 62 |
| 7.2 | wrist control | 63 |
| 7.3 | required track motion | 64 |
| 7.4 | joystick angle | 64 |
| 7.5 | method 1 | 65 |
| 7.6 | method 2 | 65 |
| 7.7 | Laser Range Finder on the wrist | 68 |
| 7.8 | Graphic user interface | 69 |
| 7.9 | LRF polygons | 69 |
| 7.10 | Approaching the operator defined line | 71 |
| 7.11 | Coordinates of the operator defined line | 71 |
| 7.12 | Specifying the rotation axis | 72 |
| 7.13 | Coordinates of rotation axis | 74 |
| 7.14 | Moving with keeping absolute position and posture of end-effector | 75 |
| 7.15 | Moving with keeping absolute position and posture of end-effector | 75 |
| 7.16 | Showing perspective by LED | 76 |
| 7.17 | Gripper camera view without LED(left), with LED(right) | 76 |
| 8.1 | Definition of joint angle | 78 |
| 8.2 | Geometry of pitch (left) and roll (right) angle | 78 |
| 8.3 | NE stability margin of pitch (left) and roll (right) angle | 79 |
| 8.4 | locomotion on a slope (experiment at Disaster City, rescue training facility in Texas) | 80 |
| 8.5 | Condition of stairs climbing | 81 |
| 8.6 | Stairs climbing with sled | 81 |
| 8.7 | Attitude of track and angle of θ_1 (Fig. 8.1) while climbing stairs. left: sled. right: passive wheel. | 82 |
| 8.8 | Running test. upside: position control only. downside: position and torque control. | 83 |
| 8.9 | Joint angle and current. left: position control only. right: position and torque control. | 84 |
| 8.10 | Lifting a 7 kg chair | 85 |
| 8.11 | CCD camera view | 85 |
| 8.12 | Dark room test | 86 |
| 8.13 | Carrying bottle while keeping posture of end-effector | 87 |
| 8.14 | Pull-type door opening flow | 88 |
| 8.15 | Pull-type door opening experiment | 90 |

| | |
|--|-----|
| 8.16 Push-type door opening experiment | 91 |
| A.1 arm Geometry | 94 |
| A.2 Joints of wrist | 96 |
| B.1 Kinematics of wrist mechanism | 97 |
| C.1 Mole I | 99 |
| C.2 Wheel in motor (left) and passive wheel (right) | 100 |
| C.3 System of Mole I | 101 |
| C.4 Wall detection | 102 |
| C.5 Detection of white line (0)Original image (1)Conversion brightness and contrast (2)Canny edge detector (3)Hough transform | 103 |
| C.6 Kinematics of detection of white line | 103 |
| C.7 Experiment in Ishikawadai | 104 |
| C.8 Trial run | 105 |

表 目 次

| | | |
|-----|---|-----|
| 2.1 | Specifications of HELIOS VII and HELIOS VIII | 7 |
| 3.1 | Classification of orientating mechanisms | 12 |
| 3.2 | Bending of link B_L | 31 |
| 3.3 | Bending of link C_L | 31 |
| 3.4 | Comparison of passive joints | 32 |
| 3.5 | Practical configuration of passive spheric joint | 32 |
| 4.1 | Specification of 6 axis force sensor (Minebea OPFT-220N) | 36 |
| 4.2 | Specification of 3 axis force sensor (Nitta PD3-32-10-80) | 36 |
| 4.3 | New measurement range | 41 |
| 6.1 | HELIOS IX Dimension | 50 |
| 6.2 | Specification | 54 |
| 7.1 | Laser Range Finder (URG-04LX) specification | 67 |
| 7.2 | Direction of rotation axis | 70 |
| 8.1 | Basic performance of HELIOS IX | 77 |
| 8.2 | Average time required | 86 |
| C.1 | Mole I Specifications | 100 |

第1章 序論

1.1 本研究の背景

地震や火災、テロなどで被災した建物内の情報収集活動においてロボットによる支援が望まれている。建物に倒壊の恐れがあったり、発生したテロが生物・化学兵器によるものであったりする場合、事前の情報なしに人が立ち入ることは危険なためである。また、2011年3月11日に発生した福島第一原子力発電所の事故により、人が直接作業を行うことが困難な環境において、ロボットを遠隔地から操作することによって作業を行わせるという需要がこれまでになく高まっている。このようなロボットには、レスキュー隊員の遠隔操作により建物内を移動し調査を行うための能力、つまり階段などの障害物を踏破する能力や、ドアの開閉、不審物などの物体ハンドリング能力などが要求される。

これらの要求に応えるため、これまでに極限環境下で作業するためのロボットが多く開発されている。現在福島原発では、放射線量の調査などに、移動性能に優れたロボットがすでに日常的に活用されている。しかしながら、今後は廃炉へ向けた膨大な作業が必要になるとされるが、このような作業性を考慮したものは大型のものが多く移動範囲は限られている。したがって、移動性と作業性を両立するロボットが必要とされている。

1.2 本研究の目的

被災した建物内などにおいて遠隔操作により、移動し作業を行うことのできるクローラ型移動作業ロボット HELIOS IX を開発することを目的とする。本研究では、特に HELIOS IX の手首機構と、移動・作業時の遠隔操作性を向上させることを目標とする。

まず、ハンドリングの作業性に大きな影響を与える主要部材である手首機構については、広い可動範囲、大きな耐荷重、防塵防水性などを有する手首機構を開発することを目的とし、球面リンク機構を利用した2自由度手首機構の設計法を論じる。次に遠隔操作系については、操縦者が現場でロボットを無理なく思い通りに遠隔操縦できるシステムを開発することを目的とする。クローラによる移動、アームを用いた物体のハンドリング、ドアの開閉作業等で、人間とロボットがお互いの長所を出し合いながら高い運動性と遠隔操作性を実現する Shared Autonomy の立場の制御系の構成を検討する。そしてこれらの考察の有効性は、HELIOS IX による操作実験によって具体的に検証する。

1.3 本論文の構成

本論文は全 9 章から構成される。

第 1 章では、本研究の背景と目的を述べた。

第 2 章では、まず、従来研究されてきた移動作業ロボットを移動方式や作業内容から概観し、これまでに開発された HELIOS シリーズを紹介する。次に、新たに開発する HELIOS IX に要求される仕様とそれを満たすための設計上の特徴を述べ、最後に、HELIOS IX を開発するにあたっての本研究で目標とする課題を説明する。

第 3 章では、広い可動範囲、大きな耐荷重、防塵防水性を有する、手首機構の設計法を論じる。まず従来の研究を概観しつつ、導入する機構の特徴を明確にする。次にその機構の基本的な運動学解析を行い、それを基に可動範囲最大化のための検討、高い出力モーメントを実現する受動対偶の構成の検討を行う。

第 4 章では、手先に柔らかさを付加するための力センサと力制御法の検討を行う。

第 5 章では、HELIOS IX の独特の形態を活用した階段昇降や対地適応動作の生成法を検討する。

第 6 章では、HELIOS IX の機械設計やシステム構成について述べる。特に手首機構は、広い可動範囲と高い耐荷重を持つことや、配線の取回し、防塵・防水処理などの工夫点を紹介する。

第 7 章では、アームを用いた物体のハンドリング、ドアやバルブの開閉作業等で、人間とロボットがお互いの長所を出し合いながら高い運動性と遠隔操作性を実現する Shared Autonomy の立場の制御系の構成を検討する。その後、Shared Autonomy の実現例として、ロボットが取得した周囲の 3D 情報距離を用いた操縦系について述べる。

第 8 章では、第 2 章で述べた要求仕様を満足しているか確認するため、あるいは各章で提案・導入してきた手法の有効性を確かめるために実験を行ったのでその結果を報告する。

最後に第 9 章において本研究の結論と残された課題について述べる。

第2章 アームを搭載したクローラ型移動作業 ロボット HELIOS IX

本章ではまず、従来研究されてきた移動作業ロボットを移動方式や作業内容から概観する。ついで、これまでに開発された HELIOS シリーズを紹介する。そして、新たに開発する HELIOS IX に要求される仕様とこれまでの HELIOS シリーズと比較して新たに加わる設計コンセプトについて述べる。

2.1 移動作業ロボット

2.1.1 脚型

脚型移動ロボットは離散的に接地点を選択しながら移動するため、後述する無限回転型にはない高い不整地踏破性、特に急な階段、大きな段差や凹凸の踏破性能が期待されている。そのため歩行アルゴリズムなど歩行ロボットそのものの研究と同時に、実際の作業を行わせることを目指した歩行ロボットの開発も行われている [1, 2]。しかしながら、実用の観点からは移動速度、移動効率、安定性、ペイロードなどが課題となっているのが現状である。

2.1.2 無限回転型

クローラは大きな接地面積を持ち、対地適応性に優れるため、極限環境下で作業するためのロボットの移動機構としてよく用いられている。これらの多くは補助フリックを装備し、地面を押しなどして階段踏破などの走行補助に用いている [3, 4, 5]。Fig. 2.1-2.3, に示すのは、それぞれ iRobot 社の「PackBot」[6]、トピー工業の「Survey Runner」[7]、千葉工業大学などのグループの「Quince」[8]である。これらは、既に福島原発に投入されており、放射線量の調査や水漏れ箇所の特定などのために用いられている。また、[9, 10, 11]に見られるようなクローラの配置や形状を変化させる機構により不整地踏破能力の向上を図っているロボットもある。車輪型は構成要素が単純で、防塵防水対策も比較的容易であるため多く用いられている [12]。[13]は1自由度のカメラアームを持ち、走行時にはアームを用いて車体を押し上げる事で不整地走破性能の向上を図っている。

現在福島原発では主にロボットは監視や探査に用いられているが、今後は除染や補修といった作業が必要となってくる。このような移動作業ロボットの作業性という観点からは、文献 [14] では建物内



Fig. 2.1: PackBot 510 (iRobot)



Fig. 2.2: Survey Runner (TOPY)



Fig. 2.3: Quince (Chiba Institute of Technology, et al.)

での探索活動において障害となるドアを開閉するためのアームを有するロボットが報告されている (Fig. 2.4). また Fig. 2.5 は, 1999 年に茨城県東海村で起きた JOC 原子炉関連事故を契機に, 日本原子力研究所 (現日本原子力研究開発機構) が開発したロボットである [15]. 最近, 福島原発で利用できるように改良が施され, 2 つのアームを用いてドアの開閉やコンクリートの汚染調査などが可能である [16]. しかし, ロボット本体は 440 kg の重量があり, 操作卓とともに大規模なため, 移動可能な領域は限られる.

2.2 HELIOS シリーズ

当研究室では, 高い移動性能と作業性能の両立を目指したレスキューロボットとして HELIOS シリーズ [17, 18] の開発を継続的に行っており, レスキューロボットのクローラユニットや作業アームおよびエンドエフェクタ, 環境認識のためのセンサ系や測定手法, 遠隔操縦技術に関する知見を積み重ねてきた. HELIOS シリーズは, 胴体の左右に独立した 2 つのクローラユニットと, 物資のハンドリングと障害物踏破を補助するためのマニピュレータを胴体部に装備している. この機構構成

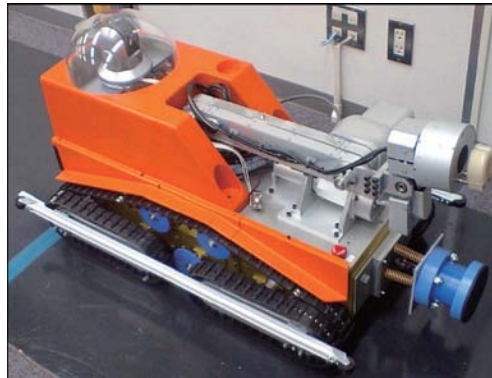


Fig. 2.4: UMRS 2007 (International Rescue System Institute, et al.)



Fig. 2.5: RaBOT (Japan Atomic Energy Research Institute)

により, HELIOS シリーズは Fig. 2.6 に示すように多様な形態を選択可能である.

従来, 移動ロボットとマニピュレーションの研究は独立に行われており, 移動機構のベース部にマニピュレータを搭載したのが多かった. 一方, HELIOS シリーズはクローラユニットの中心部にマニピュレータを直結させたベース部を持たない形態のため, コンパクトであり, アームを動かすことにより大きな重心移動を可能としている. このため比較的急な斜面や階段の昇降も可能である. また, Fig. 2.8 に示すように階段昇降時にはアームの一部に取り付けられた受動輪を地面に押しつけてフリッパアームのように用いている.

[19] でも同様の形態が提案されているが, アームは1つのアクチュエータによってクローラと接続されているため, Fig. 2.6-(b), (e) に示すような形態を選択することはできない.

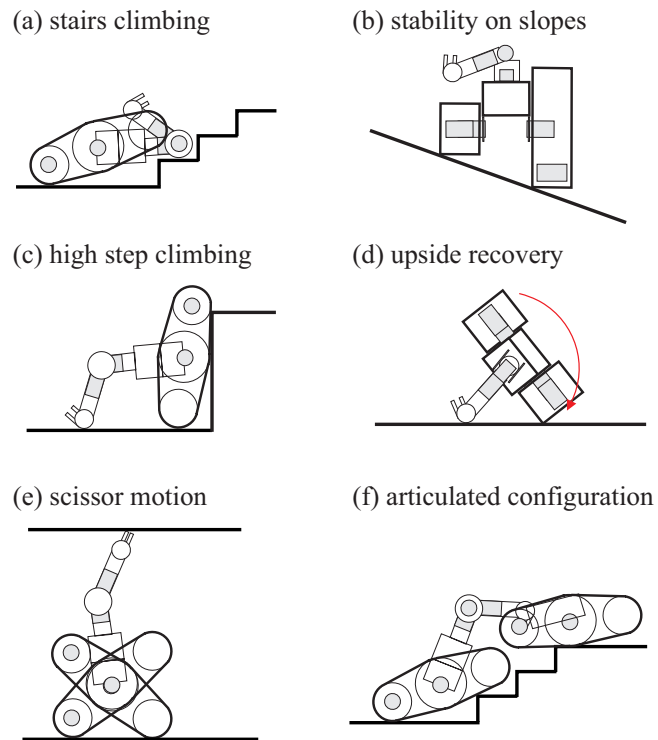


Fig. 2.6: HELIOS concept motion capabilities



Fig. 2.7: HELIOS VII (left) and HELIOS VIII (right)

2.3 HELIOS IX の要求仕様

HELIOS IX の開発は, "NEDO(独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構) 戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト被災建造物内移動 RT システム (特殊環境用ロボット分野) マニピュレータを有する高機能クローラユニットの研究開発" の一環として行われた. このプロジェク

Table 2.1: Specifications of HELIOS VII and HELIOS VIII

| | HELIOS VII | HELIOS VIII |
|----------------------|------------|-------------|
| Weight | 90 kg | 43 kg |
| Width | 625 mm | 486 mm |
| Length | 712 mm | 540 mm |
| Arm(extended) | 1200 mm | 650 mm |
| Arm DoF | 5 | 3 |
| Track unit (width) | 200 mm | 122 mm |
| Track unit (height) | 230 mm | 202 mm |
| Speed on flat ground | 0.72 km/h | 3 km/h |



Fig. 2.8: HELIOS VIII- stairs climbing test

トは、機能を分担する複数台のロボットによって、地下鉄構内、トンネル、空港、オフィスビル、ショッピングモールなどにおいて、歩行者や障害物の回避・乗り越え・軽量物の排除を行いながら迅速に情報収集可能とするシステムを研究・開発することを目標とする [20]。複数台のロボットの中で、主にハンドリング作業を行う HELIOS IX に求められる機能を挙げる。

1. 有線または無線通信によって遠隔操作される。
2. バッテリーをロボット内部に搭載し、連続 1 時間以上の稼働時間をもつ。
3. 探索する建物内の映像情報を取得する。
4. 照明のない場所でも作業できる。
5. 階段を含む建物内環境で、迅速に歩く人と同程度の平均速度で移動する。

6. ドアノブのついたドアを通り抜ける。
7. コンパクト・軽量で機動的なヒューマンインターフェースをもつ。

2.4 HELIOS IX の設計方針

階段昇降やある程度の不整地走行はこれまでに開発した HELIOS VII, VIII で動作を確認してきた。しかし、「ドアの開閉」などの複雑な作業には対応できない。HELIOS IX は、これまでの HELIOS シリーズのコンセプトを踏襲しながら、作業性を向上させるため、器用な手首機構や、力センサや距離センサなどを用いた新たな操作系を導入し、要求された特性を発揮するため、次の要素や特徴から構成することとした。上記の要求仕様の番号に対応させている。

1. 無線 LAN ルータを搭載し有線/無線 LAN によって遠隔操作可能とする。
2. 左右のクローラユニット内部にクローラ駆動用のバッテリーを配置し、アームの第一節にアームや主計算機などを駆動するバッテリーを搭載し、計 3 つのバッテリーを用いて長い稼働時間を旨とする。
3. エンドエフェクタと、カメラアームと名付けた 1 自由度機構の先端にカメラを搭載する。前者はハンドリング時に対象物をよく観察できるようにするため、後者は周囲の環境とロボット自身を確認するためである。
4. 上記のカメラの近くに LED を搭載し、照明のない場所でも作業可能とする。
5. クローラは 200 W ブラシレス DC モータによって駆動され平地では 7 km/h の走行を可能とする。
6. ドアノブの回転や不審物やセンサ類のハンドリングを可能とするため搭載するアームは 6 自由度とし、長さはドアノブを掴み回転させる必要があることから 1.2 m とする。
7. 操縦者が把持しやすく姿勢センサを搭載した軽量・安価なゲームコントローラを使用して、直観的に操作できるようにする。

その他に、タスクの遂行に必要と思われる下記の特徴を持たせることとした。

- 一般的な自動改札の幅は 550 mm であり、それを通過可能な車体の幅とする。
- 室内環境の障害物 (椅子など) を排除するためペイロードは 8 kg とする。
- 軽量化のためロボットのボディの大部分にユニレートやカーボンファイバーを使用する。
- 爆発性ガスが充満した環境でも作業できるように、全てのアクチュエータに火花の散らないブラシレス DC モータを採用する。

HELIOS IX を開発するに当たり、本研究では以下の課題を目標とする。

2.4.1 手首機構

手首機構はドアの開閉やバルブの回転といった作業において、広い可動範囲が要求される。同時に、様々な手首姿勢でトルクを発生できなければならない。また、防塵防水性や Fig. 2.6 の (c), (d) の動作時のような手首に大きな負荷のかかる動作への対応も必要である。本研究では上記の特性を有する手首機構の設計について検討していく。第 3 章で詳細を議論する。

2.4.2 クローラの移動操作性の向上

HELIOS VIII は、受動車輪をフリッパのように用いることによって階段昇降が可能であることを述べたが、受動車輪が取り付けられたアームを階段の形状に合わせて操作する必要があり、そのためにカメラの視点も変化してしまう。また、片側のクローラが段差に乗り上げた際、反対側のクローラも持ち上がり、不安定な状態となってしまう。操縦者がロボットに搭載された画像からこれらの問題に対処するのは困難であり、フリッパ部の形状と HELIOS IX の自由度を活かした制御法の検討が必要である。具体的な検討を第 5 章で行う。

2.4.3 作業アームの操作性の向上

例えば、目標物を発見した時にそれに手を伸ばして把持しようとする動作を手動操縦で行おうとすると、画像情報のみでは距離感が得にくく、困難なことが多い。手動操縦では細かい位置合わせは難しく、仮にドアノブのような固定された物体を把持できたとしても、アームに内部力が発生してしまう可能性がある。また、ドアノブを回転させる動作では、アームの 6 自由度を同時に操作する必要があり、ロボットを目視した状態であっても難しい。このような完全な手動操縦では操縦者の負担が大きい。しかし、未知の環境でロボットが自律的に動作することも困難である。そこで本研究では、ロボットにある程度の自律機能を持たせ、遠隔操縦と的確に組み合わせる Shared Autonomy の立場の遠隔操作系の構成を検討する。具体的には第 7 章で議論し、第 4 章で詳述する力センサとも組み合わせたシステムについて検討していく。

2.5 まとめ

本章では、これまでに開発した HELIOS シリーズを紹介し、新たに開発する HELIOS IX の設計方針は、これまでの HELIOS シリーズのコンセプトを踏襲しながら、「ドアの開閉」などの新たな要求に対応するものであることを述べた。最後に、HELIOS IX を開発するにあたっての本研究で目標とする課題を説明した。

第3章 HELIOS IXの手首機構

ロボットアームの手首機構は、そのハンドリングの作業性に大きな影響を与える主要部材であり、その最適化設計の重要性は著しく高い。これまで多くの手首機構が開発されて来ているが、コンパクト性、可動範囲、負荷荷重特性などの点で、未だ理想的な手首機構は実現されていない。本章では、これらの特性をかなりの部分発揮できると考えられる 2-DoF Spherical Parallel (2DSP) 機構と呼ぶ手首機構を提案する。

3.1 手首機構の設計に関する考察

2章で紹介した移動作業ロボットに装備する手首機構には、以下の3つの特性の導入が不可欠であると考えている。

- (1) 広い可動範囲：ドアやバルブにいろいろな方向から近づき操作するための特性。
- (2) 高い出力モーメント特性：様々な手首姿勢で対象に対して十分なトルクを発生するための特性。
- (3) 高い中心負荷力特性：ここで言う中心負荷力特性とは、ハンドが Fig. 3.1-(a), (b) に示すように重量物を持ち上げる場合や、地面などを押さえつけるような場合に、そのハンドに大きな力が働くが、そのような力を十分支えられる力を生成するための特性である。主として中心を通る負荷力を支えることが必要となるため、このように呼んでいる。屋外作業を行う移動ロボットのハンドには、このような中心負荷力が働く場合が多いので、この特性も重要である。

本研究は、これら3つの特性を有する手首機構を開発することを目的とし、まず、これに関連する従来の研究を概観しつつ、導入する 2DSP 機構の特徴を明確にする。次にその基本的な運動学解析を行い、それを基に、可動範囲最大化のための検討、高い出力モーメントを実現する受動対偶の構成の検討を行う。

3.2 従来の手首機構

これまでに産業用マニピュレータの手首機構などとして、様々な姿勢制御機構が研究・開発されてきた [21, 22]。いくつかの例を Table 3.1 に示す。

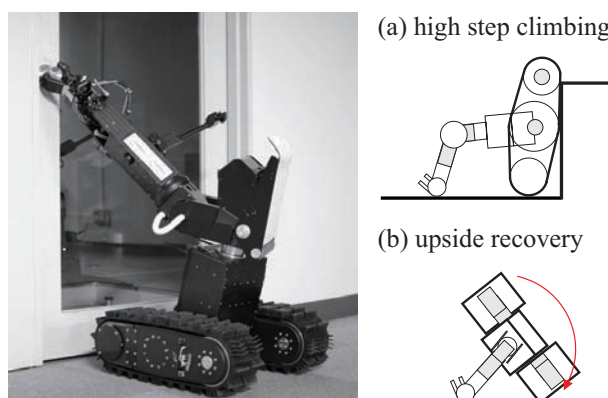
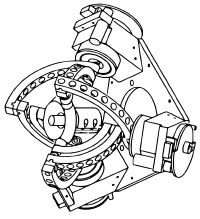
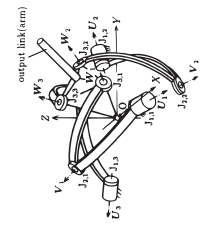
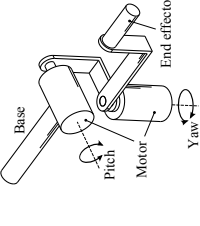
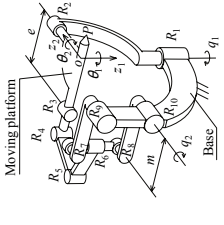

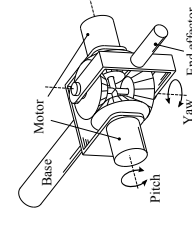
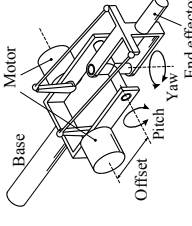
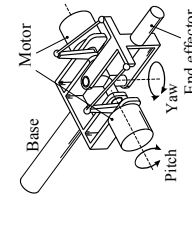


Fig. 3.1: Operation to which large load acts on the wrist

機構 A, B は 3 自由度球面リンク機構である。このうち機構 A は、カメラの雲台として開発されたものである [23]。高速な動作が可能であるが、モーメント荷重や中心負荷力に対して各リンクに曲げモーメントが発生するため、大きな荷重には耐えにくい。機構 B はベースとエンドエフェクタを中心部の球対偶で接続した構造である [24]。この球対偶が中心負荷力を支持するため、中心負荷力特性は高く、各節の弾性変形を抑制することができる。これら 3 自由度球面リンク機構である機構 A, B の問題点は、roll 軸の可動範囲を大きくとることが難しい点である。例えば、機構 A の roll 軸の可動範囲は $\pm 30^\circ$ となっており、手首機構としては不十分である。したがって本研究では、このタイプの機構は対象とせず、手首部は基本的に 2 自由度 (pitch, yaw) であって、ベース側またはエンドエフェクタ側のどちらかにもう 1 自由度 (roll) を取り付けることで、3 自由度機構を実現する構造を対象として検討していく。以降に示す機構 C-H は、そのタイプの構造である。

機構 C は産業用マニピュレータなどで多く用いられている、各回転軸にアクチュエータを配置したシリアルリンク機構である。機構 D はリンク機構によりベース部に配置した 2 つのアクチュエータから独立に pitch, yaw 軸を制御可能とするものである [25]。これはやや複雑であり大きなトルクを出力するためには寸法と重量が大きなものとなる可能性がある。機構 E は 120° ごとに配置された 3 組のリンクのうち 2 つにアクチュエータを設けている。これは二重関節構造となっており、大きな可動範囲を持つ [26]。これら機構 C, D, E は中心負荷力を駆動用のリンクで受ける構造となっており、中心負荷力特性は低いのが問題である。

Table 3.1: Classification of orientating mechanisms

| | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|----|-------------------------|--|------------------------|---|--|------------------------|----------------|--|----|---------------------------------|--|
| | A: | 3 DoF spherical link |  | B: | 3 DoF spherical link with a spheric joint |  | C: | Serial link |  | D: | Spherical decoupled |  |
| Workspace | | Middle | | Middle | | Middle | Large | | Middle | | | |
| Torque output | | Unknown | | Unknown | | Unknown | Unknown | | Middle | | | |
| Capability of supporting central load | | Low | | High | | Low | Low | | Low | | | |
| Application | | Camera orientation | | Industrial manipulator | | Industrial manipulator | Industrial manipulator | | Solar panel orientation | | | |
| Reference | | [23] | | [24] | | [27] | [25] | | [25] | | | |
| | E: | Constant-velocity joint |  | F: | Differential gear |  | G: | Offset of axes |  | H: | Base mechanism of this research |  |
| Workspace | | Large | | Middle | | Bad | Large | | Large | | | |
| Torque output | | Unknown | | Middle | | Middle | High | | High | | | |
| Capability of supporting central load | | Low | | High | | High | High | | High | | | |
| Application | | Camera orientation | | Industrial manipulator | | Propeller orientation for underwater vehicle | Ankle of walking robot | | | | | |
| Reference | | [26] | | [28] | | [29] | [30] | | [30] | | | |

それに対し、以降の機構 F, G, H はいずれも中心部にユニバーサルジョイントを有し、中心負荷力をそのユニバーサルジョイントが受けるため大きな荷重に耐え得る構造である。機構 F は差動歯車を使用したものであるが、大きなトルクを伝達するためにはモジュールの大きな歯車が必要となり、寸法と重量が大きなものになってしまう。機構 G はユニバーサルジョイントによって支持されたエンドエフェクタを左右のリンクを使って駆動するものである。この機構ではアクチュエータの出力軸とエンドエフェクタの回転軸 (pitch) とが離れて配置されているため、アクチュエータ部を防水しやすい構造であるが、可動範囲を大きくとることは難しい [29]。また、pitch 方向の可動範囲限界の付近でモーメント荷重に対して剛性を高くすることが難しい。機構 H が本研究で対象とする構造である。これも機構 G と同じくユニバーサルジョイントによって支持されたエンドエフェクタを左右のリンクを使って駆動するものであるがアクチュエータの出力軸とエンドエフェクタの回転軸 (pitch) を一致させている。そのため、pitch 軸を回転させてもリンク系の形状は変化せず、高い出力モーメントと大きな可動範囲を実現可能である。

このように、従来の機構の中では機構 H が要件 (1), (2), (3) の観点から最も適当と思われる。そのため本研究ではこの機構 H を採用する。

3.3 2-DoF Spherical Parallel (2DSP) 機構の提案とその基本運動学解析

3.3.1 2-DoF Spherical Parallel (2DSP) 機構の提案

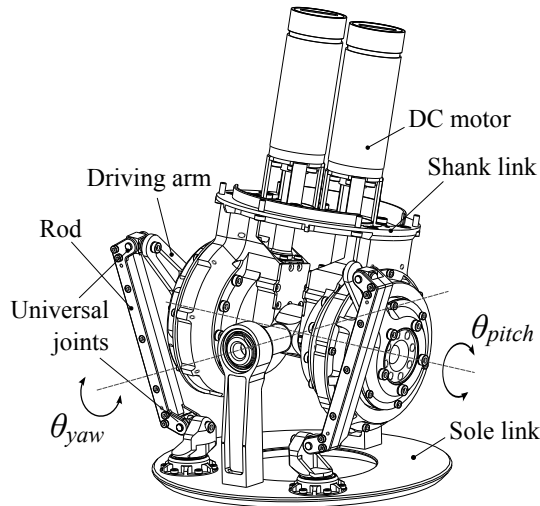


Fig. 3.2: Two DoF coupled drive ankle mechanism for walking robots

Table. 3.1 の機構 H は、すでに、当研究室で歩行ロボットの足首機構や HELIOS IX の手首機構の一次試作機に採用した実績があるものである。歩行ロボットの足首機構は比較的大きな可動範囲 ($\theta_{yaw} : \pm 65^\circ, \theta_{pitch} : \pm 80^\circ$) を持ち、防塵性などの実用的な設計も行っていた (Fig. 3.2) [30].

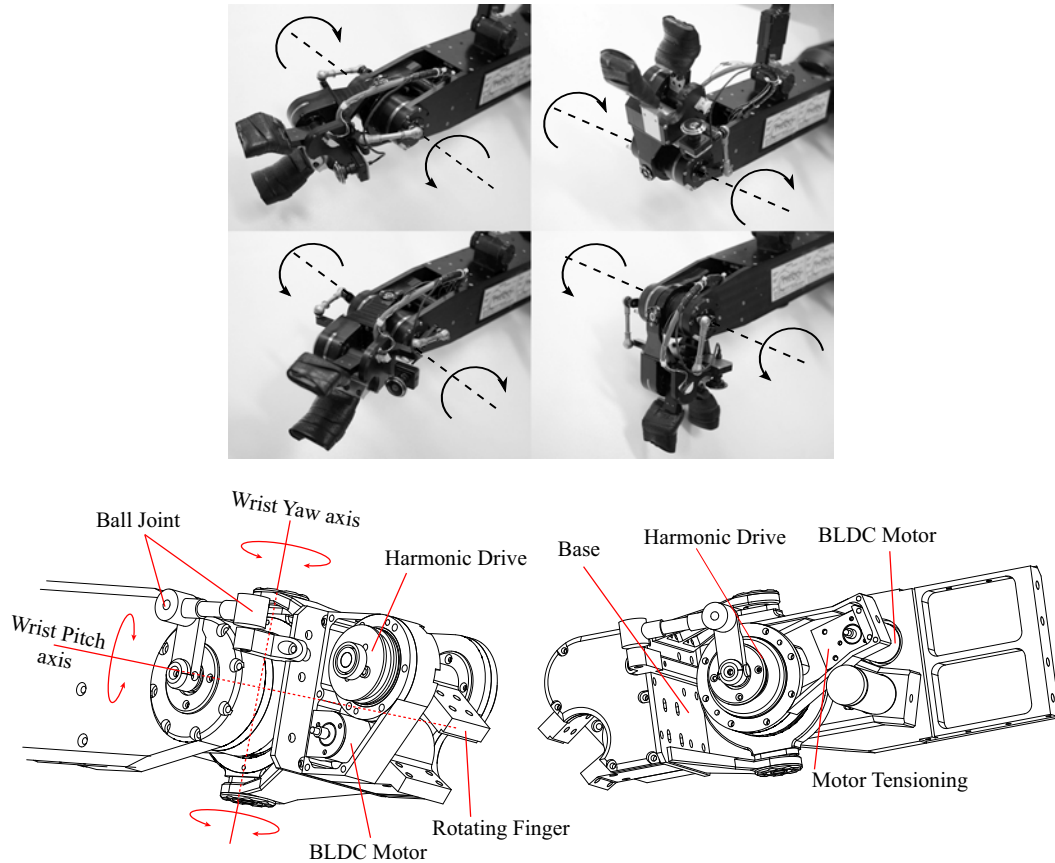


Fig. 3.3: First model of wrist mechanism and actuation

Fig. 3.3 に示す手首機構の一次試作機の可動範囲は、pitch 軸と yaw 軸がそれぞれ、 $\pm 90^\circ, \pm 19^\circ$ となっており、場合によっては可動範囲が不足し、対象物を拾う動作やドアノブを回転させる動作を行えなくなることがあった。また、張り出したリンクや手先部へのケーブルが把持しようとした対象物の周囲に接触してしまうこともあった。さらに、防塵防水性や Fig. 3.1 の (a), (b) の動作時のような手首に大きな負荷のかかる動作に対する検討も十分行われていなかった。

本研究は、歩行ロボットの足首機構や一次試作機の設計をさらに改善し、より広い可動範囲と、負荷荷重特性、そしてより改善された防塵防水性などを実現することを目的とする。それを実現するために着目したのが、この機構 H の特有の機構構成である。機構 H は Fig. 3.4 に模式的に示すように、前腕部と手先部が軸 a、軸 b で構成されるユニバーサルジョイントで連結され、軸 a の同軸に回転を

出力する左右のアクチュエータに取り付けられたリンクの先端の受動対偶 u_L, u_R と、手先部に取り付けられた受動対偶 v_L, v_R を連結リンク c_L, c_R でつないだ構成をなすことが特徴である。そしてこのような構成であるため、4つの受動対偶 u_L, u_R, v_L, v_R はすべて、軸 a, b の交点 o を中心とする球殻上を移動する球面リンク機構となっている。そのため、この機構 H の4つの受動対偶 u_L, u_R, v_L, v_R は、Fig. 3.2 のように、 u_L と v_L, u_R と v_R のペアそれぞれに5自由度、合計10自由度の受動自由度を設けなくてもよく、受動対偶 u_L, u_R, v_L, v_R はすべて、中心点 o から放射状に伸びる軸周りに1自由度受動回転軸で構成でき、受動対偶は合計4自由度で済むことになる。Fig. 3.4 は、このように1自由度受動対偶を有する形態を成した機構 H であり、以降これを 2-DoF Spherical Parallel (2DSP) 機構と呼ぶことにする。

Table 3.1 の機構 H を、このように球面リンク機構と見なし1自由度受動対偶を導入する 2DSP 機構は、機構的な、また運動解析的な優位性を生み出す。機構的な優位性に関しては第 3.5 章以下で論ずる。運動学的な優位性について説明する。従来の設計、解析方法は、設計パラメータが多く、可動範囲を最大化するためにリンク長などは試行錯誤的に決定していた。また、特異点の解析は入出力間の速度の関係式だけでなく、その間の受動対偶の特異姿勢も考慮しなければならないといった問題があった [31]。それに対し 2DSP 機構では、設計パラメータが減少し、可動範囲の最大化と特異点の解析を容易に行えるようになる。さらに、常に全ての対偶の回転軸が1点で交わるのが陽に示されるため、文献 [31] で議論している受動対偶の特異姿勢を特に考慮する必要がなくなるという点で優位である。詳細な議論は以降で行う。

3.3.2 基本運動学解析

提案する 2DSP 機構の第 3.4 章での可動範囲解析や、第 3.5 章での静力学解析の基となる運動学解析を行う。球面三角法 [32] を用いて入出力の角度の関係式を求めることも可能であるが、ここでは行列を用いた計算法を示す。

解析に使用する座標系 (x, y, z) と (x', y', z') の原点をユニバーサルジョイントの回転軸の交点に置き、座標系 (x, y, z) を前腕に、座標系 (x', y', z') を手先に図 3.4 のように固定する。前腕に対する手先の姿勢 $(\theta_{pitch}, \theta_{yaw}) = (0, 0)$ のとき両座標系は一致する。以下では左側のリンクに注目し、添え字 L をつける。単位ベクトル u_L, v_L は受動対偶 u_L, v_L の回転軸を表し、 θ_L は y 軸と u_L を通る平面と yz 平面との角度、 l_1 は y 軸と u_L 、 l_2 は u_L と v_L 、 l_3 は z' 軸と v_L とがなす角度とする。 α は、 z' 軸と v_L を通る平面と $x'z'$ 平面との角度と定義する。右側のリンクについても同様に定義し、各対偶間の角度 (l_1, l_2, l_3, α) は左右で共通とする。

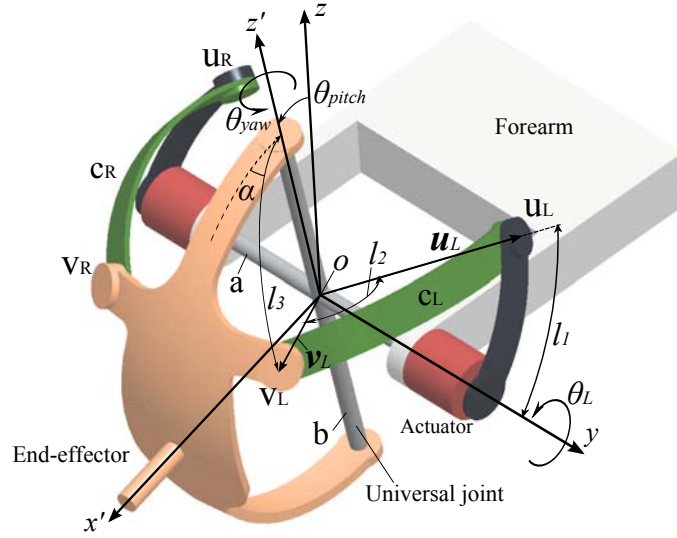


Fig. 3.4: Kinematic model of the wrist

u_L, v_L, u_R, v_R は回転行列 $R(axis, angle)$ を用いて以下のように表すことができる.

$$u_L = R_{y, \theta_L} R_{x, l_1} (0 \ 1 \ 0)^T \quad (3.1)$$

$$v_L = R_{y, \theta_{pitch}} R_{z, (\theta_{yaw} + \alpha)} R_{y, l_3} (0 \ 0 \ 1)^T \quad (3.2)$$

$$u_R = R_{y, \theta_R} R_{x, -l_1} (0 \ -1 \ 0)^T \quad (3.3)$$

$$v_R = R_{y, \theta_{pitch}} R_{z, (\theta_{yaw} - \alpha)} R_{y, l_3} (0 \ 0 \ 1)^T \quad (3.4)$$

左右それぞれの内積は

$$u_L \cdot v_L = \cos l_2 \quad (3.5)$$

$$u_R \cdot v_R = \cos l_2 \quad (3.6)$$

これを整理すると、次の式が得られる. 以下, $\sin(x) = S_x$, $\cos(x) = C_x$ と省略して表す.

$$\begin{aligned} f_L &\equiv S_{l_1} C_{l_3} C_{(\theta_L - \theta_{pitch})} + S_{l_3} C_{l_1} S_{(\theta_{yaw} + \alpha)} \\ &\quad + S_{l_1} S_{l_3} S_{(\theta_L - \theta_{pitch})} C_{(\theta_{yaw} + \alpha)} - C_{l_2} = 0 \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} f_R &\equiv S_{l_1} C_{l_3} C_{(\theta_R - \theta_{pitch})} + S_{l_3} C_{l_1} S_{(-\theta_{yaw} + \alpha)} \\ &\quad + S_{l_1} S_{l_3} S_{(\theta_R - \theta_{pitch})} C_{(-\theta_{yaw} + \alpha)} - C_{l_2} = 0 \end{aligned} \quad (3.8)$$

式 3.7, 3.8 をそれぞれ θ_L, θ_R について解くと, 逆運動学解が解析的に得られる. 式 3.7 を

$$d = (C_{l_2} - C_{l_1} S_{l_3} S_{(\theta_{yaw} + \alpha)}) / S_{l_1} \quad (3.9)$$

$$r = \sqrt{C_{l_3}^2 + S_{l_3}^2 C_{(\theta_{yaw} + \alpha)}^2} \quad (3.10)$$

$$\phi = \text{atan2}(C_{l_3}, S_{l_3} C_{(\theta_{yaw} + \alpha)}) \quad (3.11)$$

と置くと,

$$\sin(\theta_L - \theta_{pitch} + \phi) = \frac{d}{r} \quad (3.12)$$

$$\theta_L = \text{atan2}\left(\frac{d}{r}, \pm \sqrt{1 - \frac{d^2}{r^2}}\right) - \phi + \theta_{pitch} \quad (3.13)$$

θ_L が求まる. θ_R についても同様にして求めることができる. また, 式 3.7, 3.8 を行列形式で表し,

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} f_L \\ f_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_L \cdot \mathbf{v}_L - \cos l_2 \\ \mathbf{u}_R \cdot \mathbf{v}_R - \cos l_2 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$\theta_I = (\theta_L, \theta_R)^T$, $\theta_O = (\theta_{pitch}, \theta_{yaw})^T$ として, 式 3.14 を微分すると入出力間の速度の関係式とヤコビ行列 J が得られる. 順運動学は解析解を求めることは困難であるが, このヤコビ行列を用いて数値的に求めることができる.

$$\mathbf{J}_I \dot{\theta}_I + \mathbf{J}_O \dot{\theta}_O = 0 \quad (3.15)$$

$$\dot{\theta}_O = \mathbf{J} \dot{\theta}_I, \quad (\mathbf{J} = -\mathbf{J}_O^{-1} \mathbf{J}_I) \quad (3.16)$$

$$\mathbf{J}_I = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \theta_I} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_L}{\partial \theta_L} & \frac{\partial f_L}{\partial \theta_R} \\ \frac{\partial f_R}{\partial \theta_L} & \frac{\partial f_R}{\partial \theta_R} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{J}_O = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \theta_O} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_L}{\partial \theta_{pitch}} & \frac{\partial f_L}{\partial \theta_{yaw}} \\ \frac{\partial f_R}{\partial \theta_{pitch}} & \frac{\partial f_R}{\partial \theta_{yaw}} \end{bmatrix}$$

各要素を以下に示しておく.

$$\frac{\partial f_L}{\partial \theta_L} = S_{l_1} (S_{l_3} C_{(\theta_{yaw} + \alpha)} C_{(\theta_L - \theta_{pitch})} - C_{l_3} S_{(\theta_L - \theta_{pitch})}) \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial f_L}{\partial \theta_R} = 0 \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial f_R}{\partial \theta_L} = 0 \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial f_R}{\partial \theta_R} = S_{l_1} (S_{l_3} C_{(\theta_{yaw} - \alpha)} C_{(\theta_R - \theta_{pitch})} - C_{l_3} S_{(\theta_R - \theta_{pitch})}) \quad (3.20)$$

$$(3.21)$$

$$\frac{\partial f_L}{\partial \theta_{pitch}} = -S_{l_1}(S_{l_3}C_{(\theta_{yaw}+\alpha)}C_{(\theta_L-\theta_{pitch})} - C_{l_3}S_{(\theta_L-\theta_{pitch})}) \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial f_L}{\partial \theta_{yaw}} = -S_{l_3}(S_{l_1}S_{(\theta_{yaw}+\alpha)}S_{(\theta_L-\theta_{pitch})} - C_{l_1}C_{(\theta_{yaw}+\alpha)}) \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial f_R}{\partial \theta_{pitch}} = -S_{l_1}(S_{l_3}C_{(\theta_{yaw}-\alpha)}C_{(\theta_R-\theta_{pitch})} - C_{l_3}S_{(\theta_R-\theta_{pitch})}) \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial f_R}{\partial \theta_{yaw}} = -S_{l_3}(S_{l_1}S_{(\theta_{yaw}-\alpha)}S_{(\theta_R-\theta_{pitch})} - C_{l_1}C_{(\theta_{yaw}-\alpha)}) \quad (3.25)$$

式 3.13 の第 1, 2 項は θ_{yaw} のみの関数であり, θ_L, θ_R は θ_{yaw} の関数と θ_{pitch} の和となる. したがって, 式 3.13 を J_I, J_O の各要素に代入すれば, これらは θ_{yaw} のみの関数となり, ヤコビ行列は θ_{pitch} に依存しないことが分かる. このことは θ_{pitch} を変化させてもリンク系の形状は変化しないことから明らかである.

3.4 可動範囲とその最大化

3.4.1 第 2 種特異点を考慮しない可動範囲の最大化

2DSP 機構は, θ_{pitch} を変化させてもリンク系の形状は変化しないため, pitch 方向の可動範囲は部品同士の干渉のみによって制限される. そのためここでは yaw 方向の可動範囲を議論する.

左側のリンクに着目し, 式 3.13 が解をもつための条件は $(\frac{d}{r})^2 \leq 1$ となることである. これを整理すると,

$$S_{l_3}^2 S_{(\theta_{yaw}+\alpha)}^2 - 2C_{l_1}C_{l_2}S_{l_3}S_{(\theta_{yaw}+\alpha)} + C_{l_2}^2 - S_{l_1}^2 \leq 0 \quad (3.26)$$

$S_{(\theta_{yaw}+\alpha)}$ について解き, $-1 \leq S_{(\theta_{yaw}+\alpha)} \leq 1$ であることから, θ_{yaw} は以下の範囲をとることができる.

$$S_{(\theta_{yaw}+\alpha)} \geq \max \left\{ \frac{\cos(l_1 + l_2)}{\sin l_3}, -1 \right\} \quad (3.27)$$

$$S_{(\theta_{yaw}+\alpha)} \leq \min \left\{ \frac{\cos(l_1 - l_2)}{\sin l_3}, 1 \right\} \quad (3.28)$$

右側のリンクについても同様にして,

$$S_{(\theta_{yaw}-\alpha)} \geq \max \left\{ -\frac{\cos(l_1 - l_2)}{\sin l_3}, -1 \right\} \quad (3.29)$$

$$S_{(\theta_{yaw}-\alpha)} \leq \min \left\{ -\frac{\cos(l_1 + l_2)}{\sin l_3}, 1 \right\} \quad (3.30)$$

θ_{yaw} は式 3.27-3.30 を満たす値をとり得るが, 途中に特異点を含む可能性があるため, これを調べ

る. 式 3.15 の J_I, J_O の行列式は, 以下のように表すことができる.

$$\det(\mathbf{J}_I) = \frac{\partial f_L}{\partial \theta_L} \cdot \frac{\partial f_R}{\partial \theta_R} \quad (3.31)$$

$$\det(\mathbf{J}_O) = \frac{\partial f_L}{\partial \theta_{pitch}} \cdot \frac{\partial f_R}{\partial \theta_{yaw}} - \frac{\partial f_R}{\partial \theta_{pitch}} \cdot \frac{\partial f_L}{\partial \theta_{yaw}} \quad (3.32)$$

$\det(\mathbf{J}_I) = 0$ となる点は第 1 種特異点, $\det(\mathbf{J}_O) = 0$ となる点は第 2 種特異点, これらが同時に起こる場合は第 3 種特異点となる [33]. 式 3.27-3.30 を満たし, これら 3 種類の特異点を含まない範囲を最大化することを考える. ここで, 例えばリンクパラメータを $l_1 = 40^\circ, l_2 = 60^\circ, l_3 = 50^\circ$ としたとき, J_I, J_O の各要素は Fig. 3.5 のようになる. $\frac{\partial f_L}{\partial \theta_L}$ と $\frac{\partial f_L}{\partial \theta_{pitch}}$ が 0 と交差する点を A , $\frac{\partial f_R}{\partial \theta_R}$ と $\frac{\partial f_R}{\partial \theta_{pitch}}$ が 0 と交差する点を B とし, $\frac{\partial f_L}{\partial \theta_{yaw}}$ が 0 と交差する点を C , $\frac{\partial f_R}{\partial \theta_{yaw}}$ が 0 と交差する点を D とする. Fig. 3.5 では $\alpha = 0^\circ$ としているが, α を大きくすると上のグラフは左へ, 下のグラフは右へシフトする. 第 1 種特異点を含まない範囲は Fig. 3.5 の $A-B$ 間である. α を大きくしていくと $A-B$ 間が広がり, A が D を, B が C を越える. すると, 式 3.32 の 2 つの項の符号が互いに異なるようになるので, 第 2 種特異点が存在し得る. このとき稼動範囲は $A-B$ 間あるいは第 2 種特異点に挟まれた区間の小さい方となるが, 第 2 種特異点を考慮した可動範囲の最大化は, パラメータが多く複雑であるため発展的な課題として次節で扱うことにする. 本節では, 可動範囲の最大化を効率よく行うために, A と D , B と C が一致するように α を選択することにした (Fig. 3.5 では約 56°). このようにすることで, 第 2 種特異点を考慮する必要がなくなり, $A-C$ 間または $B-D$ 間が本機構の可動範囲となる.

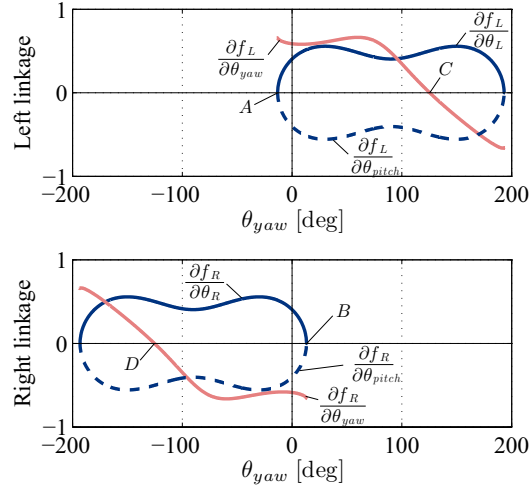


Fig. 3.5: Elements of Jacobi matrix. ($l_1 = 40^\circ, l_2 = 60^\circ, l_3 = 50^\circ, \alpha = 0^\circ, \forall \theta_{pitch}$)

α を上述のように決定することになると, 本機構の可動範囲は (l_1, l_2, l_3) によって決定される. こ

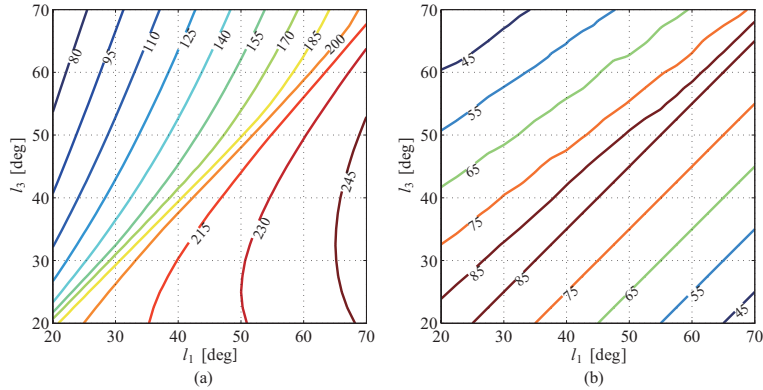


Fig. 3.6: Contour line. (a) Optimum range of θ_{yaw} [deg] (b) Optimum length of l_2 [deg].

これらの関係を調べるため、 l_1 , l_3 を変化させ、 l_2 は l_1 , l_3 が与えられた時の最大の可動範囲を持つような値 (Fig. 3.6(b)) としたときの可動範囲を調べた。Fig. 3.6(a) はその可動範囲の等高線を示している。現実的な可動範囲 (200° 以下) において、適切な l_2 を選んだ場合、 l_1 を大きくするほど、 l_3 を小さくするほど可動範囲は大きくなる傾向が読み取れる。

以下に今回行った 2DSP 機構の可動範囲を最大化する手順をまとめる。

1. 部品同士が干渉しない程度に l_1 を大きく、 l_3 を小さくする。
2. l_1 , l_3 から Fig. 3.6 を用いて最適な l_2 を求める。
3. l_1 , l_2 , l_3 からヤコビ行列の要素を求め、Fig. 3.5 の $A - C$ 間の中間点を α とする。

第 6 章で述べる実際の手首機構では、この方針に沿って設計を進め、リンク長を、 $l_1 = 42^\circ$, $l_2 = 74^\circ$, $l_3 = 50^\circ$, $\alpha = 40.8^\circ$ として、 $\pm 75^\circ$ の yaw 軸可動範囲を実現した。

3.4.2 第 2 種特異点と出力トルクを考慮した可動範囲の最大化

第 2 種特異点を考慮して可動範囲の最大化を行えば、運動学上はさらに大きな可動範囲を実現することが可能である。しかし、第 2 種特異点付近では、出力節に与えられたトルクを支持できず、3.1 節で述べた「(2) 高い出力モーメント特性」を発揮できない可能性があるため、出力節において出力可能なトルクを考えていくことにする。

Fig. 3.7 に示す (Fig. 3.4 を簡素化した) 2DSP 機構のアクチュエータのトルク、つまり入力トルクを $\tau = (\tau_{\theta_L}, \tau_{\theta_R})^T$ とすると、出力トルク $T = (\tau_{pitch}, \tau_{yaw})^T$ は、式 3.16 のヤコビ行列 J を用いて、

$$T = (J^T)^{-1} \tau \quad (3.33)$$

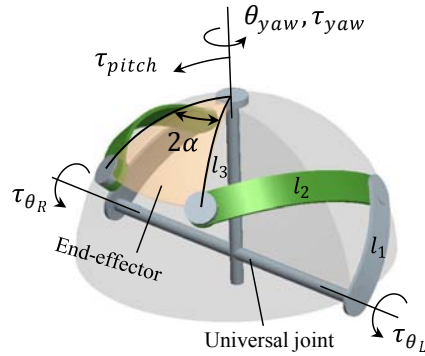


Fig. 3.7: Kinematic model of 2DSP mechanism.

と表される. 出力トルクの限界はアクチュエータのトルクの限界により定まる. 入力トルク $\tau_{\theta_L}, \tau_{\theta_R}$ の最大の大きさをそれぞれ 1 とすると, 入力トルクは Fig. 3.8 左のように横軸に τ_{θ_L} , 縦軸に τ_{θ_R} とすれば, 正方形の内側として表すことができる. これに対応する出力トルク T は Fig. 3.8 右のような平行四辺形の内側となり, その平行四辺形の内接円の半径を r_τ とする. r_τ は, ある姿勢で出力節が全方向に発生できる最大のトルクの, アクチュエータトルクに対する比を意味し, 文献 [34] で全方向最大発生モーメントと呼んでいるものに対応する.

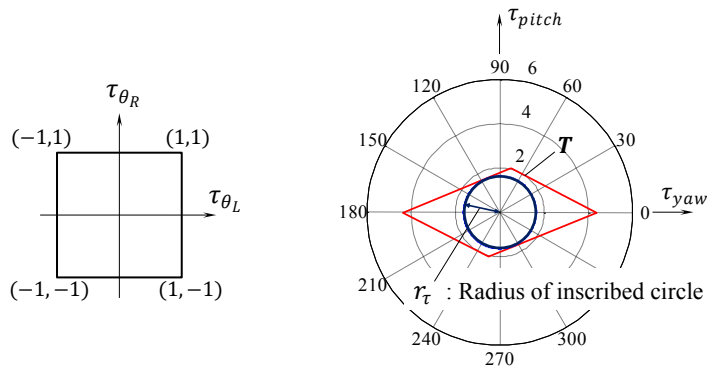


Fig. 3.8: Left: input torque space. Right: Output torque space.

ここで, 可動範囲は第 1 種から 3 種までの特異点を含まない範囲であることに加えて, $r_\tau > r_{\tau min}$ ($r_{\tau min}$ は正の定数) である範囲とし, その範囲を最大化することを考える.

$$r_{\tau min} = 0$$

まず, $r_{\tau min} = 0$, つまり出力トルクの制約を考慮せず, l_1, l_3 を与えて可動範囲を最大化する l_2, α をしらみつぶしに探索したときの結果を Fig. 3.9 に示す.

前節と同じ l_1, l_3 (それぞれ $42^\circ, 50^\circ$) を選択すると, $l_2 = 81.9^\circ, \alpha = 80.1^\circ$ となり, その時の可動範囲は $\pm 126.7^\circ$ となる. そのリンクパラメータを採用した時の機構のモデルを Fig. 3.10 に, r_τ と θ_{yaw} の関係を Fig. 3.11 に示す. 前節での可動範囲 ($\pm 75^\circ$) と比べて非常に大きな可動範囲を実現できるが, $\theta_{yaw} = 105^\circ$ 付近で r_τ は 0 に近づき, ほとんどトルクを支持できない方向があることが分かる.

$$r_{\tau min} = 0.5$$

次に, $r_{\tau min} = 0.5$ として, l_1, l_3 を与えて可動範囲を最大化する l_2, α をしらみつぶしに探索したときの結果を Fig. 3.12 に示す. 前節と同じ l_1, l_3 (それぞれ $42^\circ, 50^\circ$) を選択すると, $l_2 = 71.7^\circ, \alpha = 64^\circ$ となり, その時の可動範囲は $\pm 95.5^\circ$ となる. そのリンクパラメータを採用した時の機構のモデルを Fig. 3.13 に, r_τ と θ_{yaw} の関係を Fig. 3.14 に示す.

また, $r_{\tau min} = 0.97$ とし, 前節と同じ l_1, l_3 (それぞれ $42^\circ, 50^\circ$) を選択するとその時の最大可動範囲は $\pm 75.68^\circ, l_2 = 74.85^\circ, \alpha = 39.6^\circ$ となり, 前節でのリンクパラメータと結果的にほぼ一致し, 6 章で述べる製作した手首機構は出力トルク特性の観点からも妥当な設計であると言える. しかし, このことは全ての場合について当てはまるとは限らないため, 本章で行った第 2 種特異点と出力トルク特性を考慮した手法は必要である. 本節での可動範囲最大化の手順を以下にまとめる.

1. 出力節が全方向に発生できる最大のトルクのアクチュエータトルクに対する比 (r_τ) の全ての姿勢の中で最小の値 ($r_{\tau min}$) を設定する.
2. Fig. 3.9 や, Fig. 3.12 のように可動範囲をマッピングし, l_1, l_3 を部品同士が干渉しない程度に可動範囲が大きくなる方へ変化させる.
3. l_2, α , を Fig. 3.9 や, Fig. 3.12 のようなマップにしたがって決定する.

前節「第 2 種特異点を考慮しない可動範囲の最大化」の手順よりも複雑となるが, 以上の手順により第 2 種特異点と出力トルク特性を考慮した可動範囲の最大化を行うことができる.

これまでも球面リンク機構の運動学や可動範囲の解析は文献 [35] などのように多く行われている. 文献 [36] では, 5 節球面リンク機構に対しリンク長さを様々に変化させ, その可動範囲をマッピングし, 設計者がそれを参照できるようにしているが, 可動範囲最大化の手順は明確に示されていない. 本研究の機構の場合には, 手首機構を球面リンク機構としたため, このように解析過程を明確化でき, 結果的に可動範囲の最大化方針を具体的に示すことが可能となった.

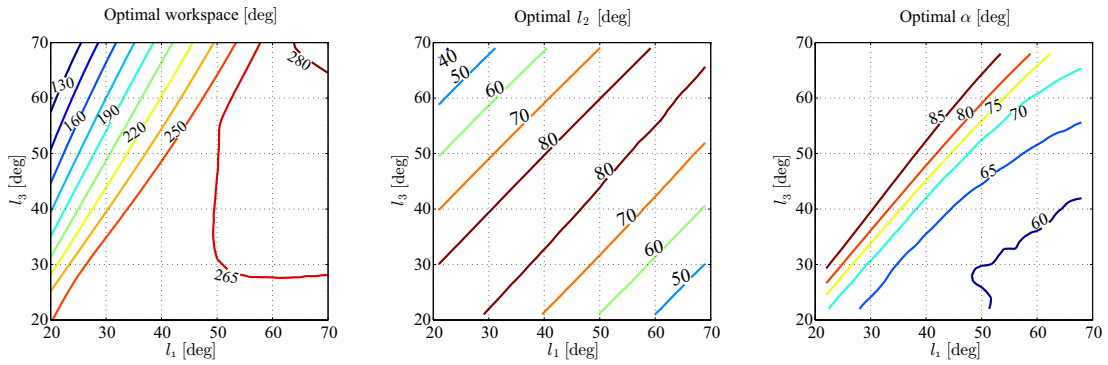


Fig. 3.9: Optimum range of θ_{yaw} ($r_{\tau min} = 0$).

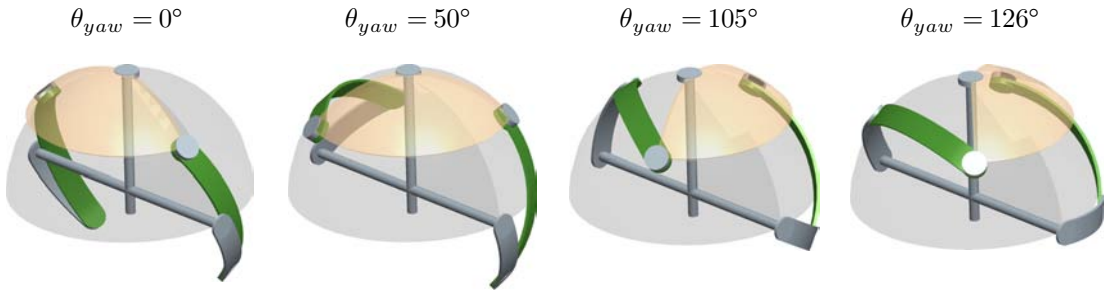


Fig. 3.10: Optimum range of θ_{yaw} ($r_{\tau min} = 0$) ($l_1 = 42^\circ$, $l_2 = 81.9^\circ$, $l_3 = 50^\circ$, $\alpha = 80.1^\circ$).

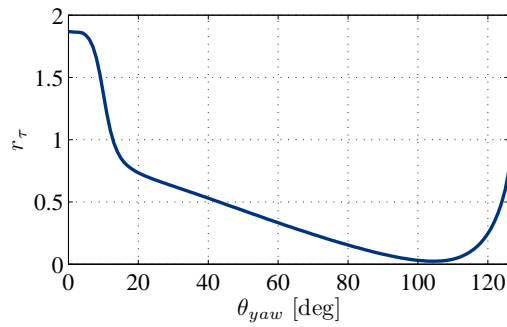


Fig. 3.11: r_τ : omni-directional maximum output torque.

3.5 2DSP 機構の受動対偶の構成法

受動対偶 (Fig. 3.4 の u_L, u_R, v_L, v_R) の構成法を検討する. これまでパラレルリンク機構に対して高い出力モーメント特性を実現するための試みとして, 文献 [37, 38] などのように入出力間のヤコ

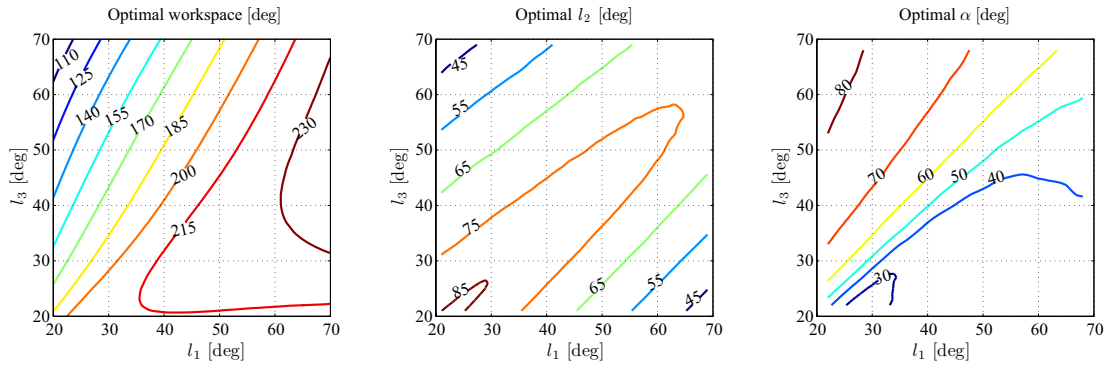


Fig. 3.12: Optimum range of θ_{yaw} ($r_{\tau min} = 0.5$).

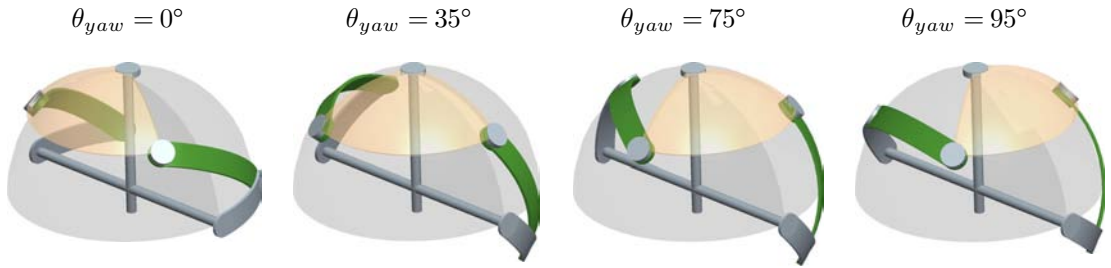


Fig. 3.13: Optimum range of θ_{yaw} ($r_{\tau min} = 0.5$) ($l_1 = 42^\circ$, $l_2 = 71.7^\circ$, $l_3 = 50^\circ$, $\alpha = 64^\circ$).

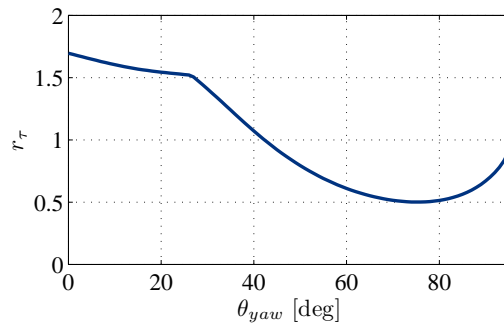


Fig. 3.14: r_τ : omni-directional maximum output torque.

ビ行列を用いて出力モーメントの向上を図った研究がある。また、文献 [39] では、静力学に基づき剛性を保ちながらリンクの質量を最小にするリンクの曲線と断面の形状を検討している。しかし、受動対偶の構成はこれまであまり議論されていなかった。本研究では受動対偶の構成によってリンク系に作用する力とモーメントの違いを考慮した設計を行う。

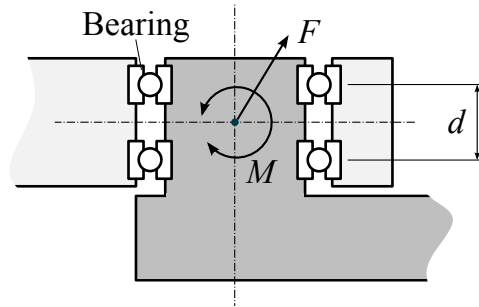


Fig. 3.15: Example of revolute joint

球面リンク機構は全ての回転軸が1点で交わる機構であり、受動対偶 (Fig. 3.4 の u_L, u_R, v_L, v_R) は Fig. 3.15 に示すようなボールベアリングを2つ使用した回転対偶で実現することがまず考えられる。この対偶は3方向の力と回転軸周り以外の2方向のモーメントをリンクからリンクへ伝達することができる。しかし、このような受動対偶を回転対偶とした場合、過拘束機構となり、各節に関する力とモーメントのつり合い式から対偶作用力・モーメントを一意に求めることはできない。文献 [40, 41] では静力学解析や動力学モデルを導く際の不静定問題を解決する手段として、1自由度の回転対偶から、軸方向の並進自由度も持つ2自由度の円筒対偶への置き換えが行われているが、実際とは異なると考えられる。ここで、この対偶に作用する力 F とモーメント M に対する剛性をそれぞれ考えることにする。力 F に対する剛性は2つのベアリングの距離 d に依存しないのに対し、モーメント M に対する剛性は d が0、つまりベアリングが1つのときには0となり、力のみを伝達する球対偶と等価となる。反対に d を無限大にするとモーメント M に対する剛性も無限大となり、モーメントのみを伝達する対偶、つまり円筒対偶とみなすことができる [42]。したがって回転対偶は、球対偶と円筒対偶の中間の特性を持つと考えられる。

その他の構成として、文献 [30] で採用したユニバーサルジョイントや、ロッドエンドベアリングが考えられるが、これらは力のみを伝達するため球対偶に含まれる。よって以降では、球対偶と円筒対偶の2つの場合について考えていき、それらの中間の特性を示すと考えられる回転対偶を含めた3種類の対偶について、以降で比較検討する。

ここで Fig. 3.16 に示す単純な例を用いて2つの構成の差について説明する。Fig. 3.16 (1) は球対偶、Fig. 3.16 (2) は円筒対偶によって受動対偶が構成された球面4節リンク機構である。節 a を原動節、節 b を従動節とし、それらの角度 ($\angle A_0OA, \angle B_0OB$) はともに 90° 、中間節 c の角度 ($\angle AOB$) は c 、機構の半径は r とする。対偶 A_0 の z 軸周りに τ_{A_0} を加えたとして力とモーメントのつり合い式から2つのモデルのリンクや対偶に作用する力とモーメントが求まる。円筒対偶型ではモーメントのみを伝達し、全てのリンクと対偶に z 軸周りにのみ τ_{A_0} が作用し、中間節 c の角度、半径 r に依

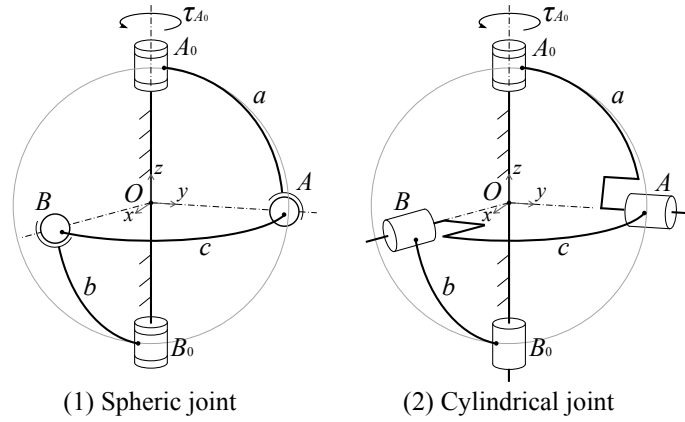


Fig. 3.16: Example of spherical 4-bar mechanisms

ない. 一方, 球対偶型は AB 間に圧縮または引張力 F が生じる. その絶対値 $|F|$ は

$$|F| = \sqrt{\frac{2}{1 + \cos(c)}} \frac{|\tau_{A_0}|}{r} \quad (3.34)$$

である. $c = 180^\circ$ では $|F|$ は無限大となり, トルクを伝達できなくなる. 中間節 c の角度が大きいときには円筒対偶型の方が有利となる. 反対に角度が小さいときには, 圧縮・引張りのみとなるので球対偶型の方が剛性を高くできる可能性がある.

3.5.1 静力学解析

リンクや対偶に作用する力とモーメントを求めるため, Fig. 3.17 に示す 2 つのモデルについて静力学解析を行う. これらは受動対偶が, (1) は球対偶によって, (2) は回転軸が中心で交わる円筒対偶で構成されている. 以下は両者共通である. 節 a を静止節, 節 b_L, b_R を原動節, 節 c_L, c_R を中間節, 節 d を従動節とする. ユニバーサルジョイントの中心部に座標系の原点を置き, $w_L, u_L, v_L, w_R, u_R, v_R$ は各対偶までの位置ベクトル, $F_{(joint\ name)}, \tau_{(joint\ name)}$ はそれぞれ各対偶に作用する力とモーメント, F_d, τ_d はユニバーサルジョイントに作用する力とモーメントとする. また, F, τ は外部からエンドエフェクタに作用する力と座標系の原点周りのモーメントとする.

球対偶

Fig. 3.17(1) のように受動対偶を球対偶で構成したときの各節の力とモーメントのつりあい式を書き並べる.

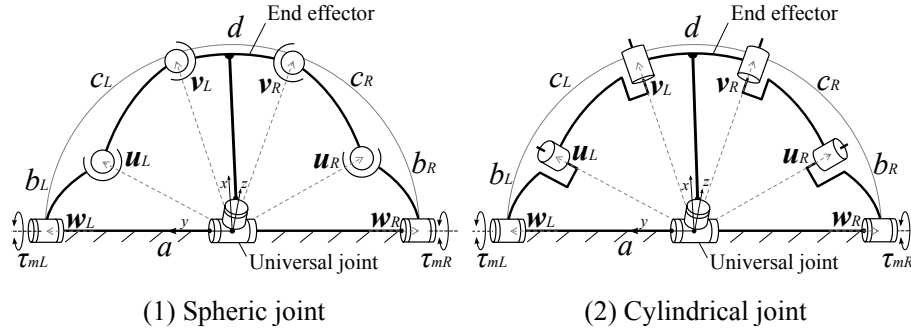


Fig. 3.17: Spherical 6-link mechanisms

b_L :

$$\mathbf{F}_{w_L} - \mathbf{F}_{u_L} = \mathbf{0} \quad (3.35)$$

$$\boldsymbol{\tau}_{w_L} + (\mathbf{u}_L - \mathbf{w}_L) \times (-\mathbf{F}_{u_L}) = \mathbf{0} \quad (3.36)$$

c_L :

$$\mathbf{F}_{u_L} - \mathbf{F}_{v_L} = \mathbf{0} \quad (3.37)$$

$$(\mathbf{v}_L - \mathbf{u}_L) \times (-\mathbf{F}_{v_L}) = \mathbf{0} \quad (3.38)$$

b_R, c_R についても同様.

d :

$$\mathbf{F}_{v_L} + \mathbf{F}_{v_R} + \mathbf{F}_d = -\mathbf{F} \quad (3.39)$$

$$\boldsymbol{\tau}_d + \mathbf{v}_L \times \mathbf{F}_{v_L} + \mathbf{v}_R \times \mathbf{F}_{v_R} = -\boldsymbol{\tau} \quad (3.40)$$

ユニバーサルジョイントは pitch, yaw 方向のモーメントは受けないことから,

$$(0 \ 1 \ 0)\boldsymbol{\tau}_d = 0 \quad (3.41)$$

$$(R_{y,\theta_p}(0 \ 0 \ 1)^T)^T \boldsymbol{\tau}_d = 0 \quad (3.42)$$

これらを行列の形式で表すと,

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (3.43)$$

円筒対偶

Fig. 3.17(2) のように受動対偶を全ての回転軸が 1 点で交わる円筒対偶で構成した場合を考える。このとき各対偶はモーメントのみを伝達することとなり、未知数は $(\tau_{w_L}, \tau_{u_L}, \tau_{v_L}, \tau_{w_R}, \tau_{u_R}, \tau_{v_R}, F_d, \tau_d)$ となる。各節の力とモーメントのつりあい式を書き並べる。

b_L :

$$\tau_{w_L} - \tau_{u_L} = 0 \quad (3.45)$$

c_L :

$$\tau_{u_L} - \tau_{v_L} = 0 \quad (3.46)$$

b_R, c_R についても同様。

d :

$$\tau_{v_L} + \tau_{v_R} + \tau_d = -\tau \quad (3.47)$$

円筒対偶の回転軸方向のモーメントは 0 であることから、以下の式が成り立つ。

$$\mathbf{u}_L \cdot \boldsymbol{\tau}_{u_L} = 0, \quad \mathbf{v}_L \cdot \boldsymbol{\tau}_{v_L} = 0 \quad (3.48)$$

$$\mathbf{u}_R \cdot \boldsymbol{\tau}_{u_R} = 0, \quad \mathbf{v}_R \cdot \boldsymbol{\tau}_{v_R} = 0 \quad (3.49)$$

ユニバーサルジョイントの剛性が高くその中心を通る力を全て受けるとすると、

$$\mathbf{F}_d = -\mathbf{F} \quad (3.50)$$

さらに、前節と同様に式 3.41, 3.42 を条件式に加えれば、未知数の数と条件式の数が一致し、全てのリンクに作用する力とモーメントが一意に得られる。

3.5.2 解析結果

左右のモータのトルク τ_{mL}, τ_{mR} は $-1 \sim +1 \text{ Nm}$ を出力可能とし、様々な姿勢 ($\theta_{yaw}: 0 \sim 75^\circ$) で受動対偶に作用する最大の力とモーメントを求めた。リンク長さなどは、6 章で詳しく述べるが、実際に製作したものをを用いている。結果を Fig. 3.18 に示す。(a) は左右の各対偶に作用する力の大きさを表しており、円筒対偶の場合は常に 0 となる。(b) は左右の受動対偶に作用するトルクを表し、球対偶の場合は常に 0 となっている。 $\theta_{yaw} = 50^\circ$ のとき、球対偶の場合には約 60 N が、円筒対偶の場合には約 3 Nm が左側の各対偶に作用する。例えば、耐荷重 60 N のベアリングがあるとき、球対偶の

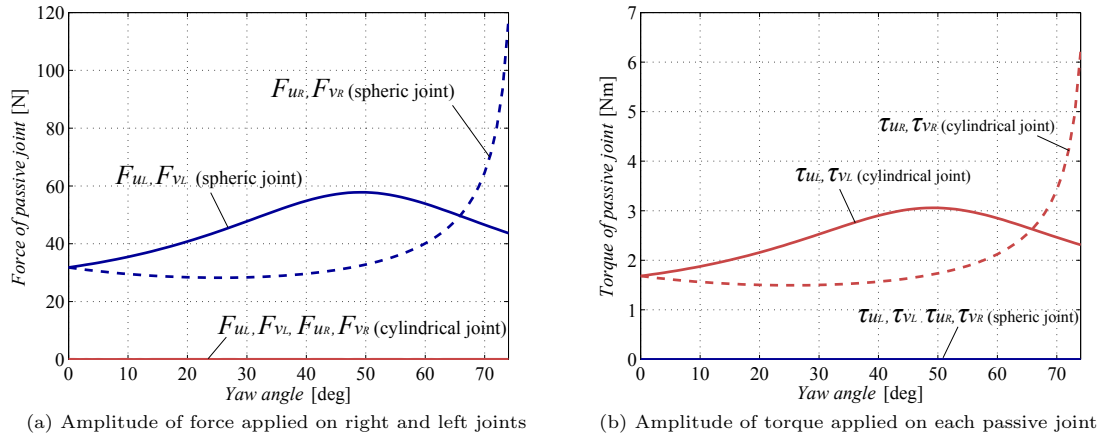


Fig. 3.18: Force and torque applied on each joint. (right and left motor output: $|\tau_{mL}| = |\tau_{mR}| = 1 \text{ Nm}$)

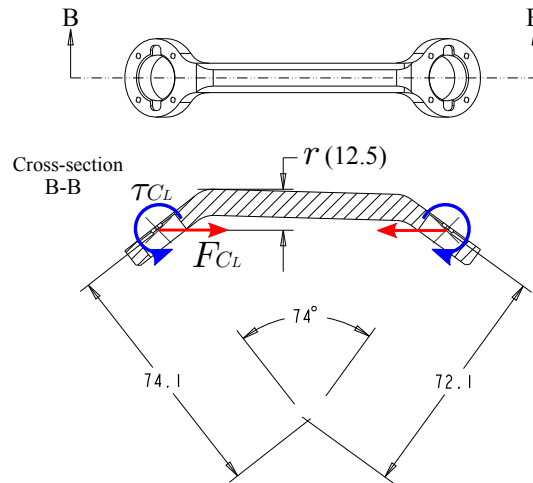
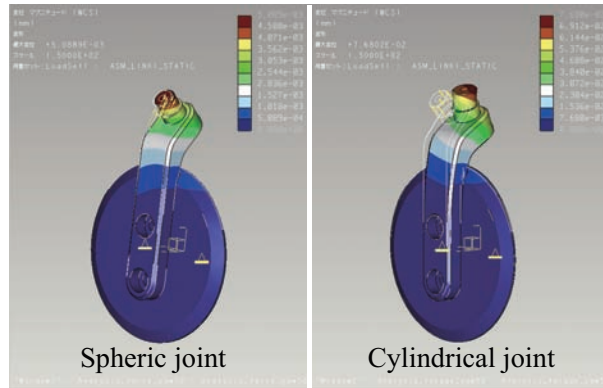


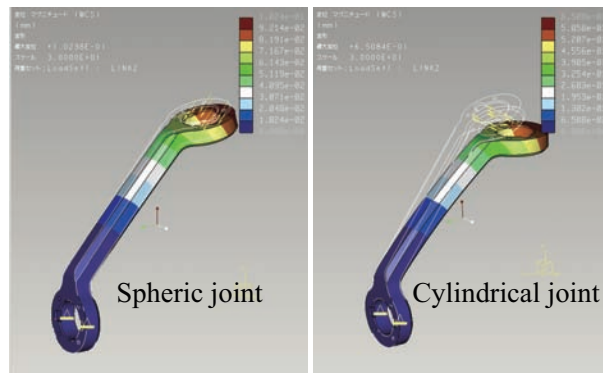
Fig. 3.19: Applied force and torque on link C_L

場合にはこれを1つ配置すればよいのに対し、円筒対偶の場合にはこのベアリング2つを50 mmの間隔をあけて配置しなければならない、大きなものになってしまう。

次に、リンクに作用する力やモーメントによるリンクの変形量を比較する。Fig. 3.19に示すのは第6章で述べる実際の手首機構の中間リンク(C_L)であり、球対偶のときには力 F_{CL} が、円筒対偶のときにはトルク τ_{CL} が作用する。リンクの変形の主要因を曲げモーメントとすると、それは球対偶のときには $F_{CL} \cdot r$ 、円筒対偶のときには τ_{CL} となる。今回のリンクの構成ではFig. 3.18より、 $r < 53 \text{ mm}$ であれば $|F_{CL} \cdot r| < |\tau_{CL}|$ となるため、同じ断面形状とすると球対偶で力を伝達した方が変形量を小

Table 3.2: Bending of link B_L 

| | Spheric | Cylindrical |
|--|----------|-------------|
| Load ($\theta_{yaw} = 50^\circ$, $ \tau_{mL} = \tau_{mR} = 1 \text{ Nm}$) | 57.8 N | 3.1 Nm |
| Maximum bending | 0.005 mm | 0.077 mm |

Table 3.3: Bending of link C_L 

| | Spheric | Cylindrical |
|--|---------|-------------|
| Load ($\theta_{yaw} = 50^\circ$, $ \tau_{mL} = \tau_{mR} = 1 \text{ Nm}$) | 57.8 N | 3.1 Nm |
| Maximum bending | 0.1 mm | 0.6 mm |

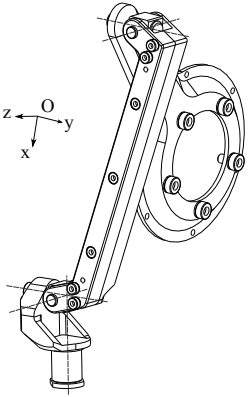
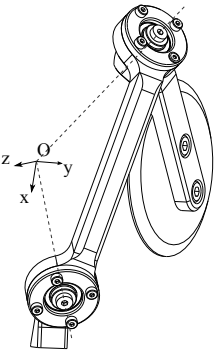
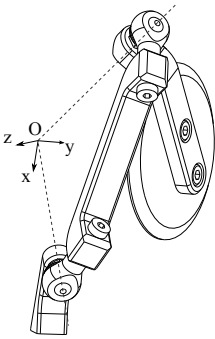
小さくすることができると思われる。

さらに各リンクごとに FEM 解析ソフト (Pro/MECHANICA) を用いて構造解析を行い、その変形量を調べた。Table 3.2, 3.3 は、 $yaw:50^\circ$ のときのリンク B_L , C_L の変形量を表しており、左側は球対

Table 3.4: Comparison of passive joints

| | Spheric | Revolute | Cylindrical |
|------------------------------|---------|------------------|-------------|
| Transmission force or moment | Force | Force and moment | Moment |
| Smallness of joint | Good | Middle | Bad |
| Bending of link | Good | Middle | Bad |
| Required alignment accuracy | Easy | Difficult | Difficult |

Table 3.5: Practical configuration of passive spheric joint

| | a. Universal joint | b. Bearing | c. Rod end |
|-----------------|--|--|---|
| |  |  |  |
| | a | b | c |
| Joint payload | 30 kgf | 50 kgf | 450 kgf |
| Backlash | Bad | Good | Good |
| Number of parts | Bad | Middle | Good |
| Friction | Middle | Good | Middle |

偶で構成したときの圧縮力を、右側は円筒対偶で構成したときの曲げモーメントを作用させたときの結果である。球対偶の場合のほうがリンクの変形量が小さくなっている。他のリンクについても同様であり、今回の場合、球対偶の方が剛性を高くしやすいことがわかる。回転対偶はすでに述べたように球対偶と円筒対偶の中間の状態であり、変形量は球対偶より大きくなると考えられる。また球対偶は、回転対偶や円筒対偶のように回転軸を厳密に一点で交わらせる必要がないため、加工精度がそれほど要求されず、組立が容易であるという利点もある。これらの理由により、本研究では球対偶を

採用する。以上の考察を Table 3.4 にまとめておく。

3.5.3 具体的な受動対偶の構造の検討

前節で、円筒対偶や回転対偶と比較し、球対偶が優位であることを論じたので、本節では具体的な受動球対偶の構成を検討する。Table 3.5 に 3 種類の受動球対偶の具体例を示す。(a) は文献 [30] の足首機構のリンク系である。球面リンク機構として設計していなかったため、受動対偶の回転軸は明確ではなく市販のボールジョイントやユニバーサルジョイントでは可動範囲が足りず専用にピンを組合せたユニバーサルジョイントを製作していた。(b), (c) は本研究で製作したリンク系で、深溝玉軸受の回転軸とロッドエンドベアリングの無限回転可能な軸を、それぞれ球面リンク機構の中心へ向けて配置している。(b) は回転対偶のように見えるが、各対偶は 1 つの深溝玉軸受で構成されておりモーメントを伝達しないため、球対偶と見なすことができる。球面リンク機構として設計することで、(b), (c) の構成も使用可能となり、バックラッシュの低減と部品点数の減少が期待できる。本研究では、耐荷重と部品点数の面で有利な (c) のロッドエンドベアリングを採用する。

3.6 まとめ

未知の環境で遠隔操作により移動・作業を行うレスキューロボットのための、球面リンク機構を用いた手首機構を提案した。中心部のユニバーサルジョイントにより大きな荷重を支持し、2 自由度の大きな可動範囲を持たせることが可能な構造となっている。まず、その運動学解析を行い、それに基づいて可動範囲を最大化する手法を提案した。つぎに、受動対偶の構成によるリンクに作用する力とモーメントの違いについて議論し、本研究の場合には剛性が高くコンパクトに設計可能な球対偶を採用することとした。

第4章 HELIOS IX の力センサとそれを用いた力制御

ドアノブやバルブなどの環境に固定された物体を把持しようとしたり、回転させようとしたりするときに、アームや対象物を破損せず、無理なくそれらの動作を行うためには柔らかさを付加することが重要である。本研究では、HELIOS IX の手先に 3 軸あるいは 6 軸力センサを取り付ける。まず、このような多軸力センサを導入する上で有効な、起歪体を用いて測定範囲を補正する手法を提案し、そしてそれを用いた力制御法の検討を行う。

4.1 力の計測方法の考察

理想的なトルクモータを使用すれば、フィードバックゲインを下げることで柔らかさを実現することができるが、本研究で対象とするような移動作業ロボットのアームの関節は高減速のアクチュエータが用いられることが多く、バックドラバビリティは低いため、それはあまり期待できない。柔らかさを実現するためには、何らかの方法で対象物から受ける力を計測する必要がある。以下で各関節のトルクを計測する方法と、手先に力センサを取り付ける方法について考察する。

4.1.1 関節トルク

各関節に作用するトルクから手先に作用している外力を推定することを考える。アームの自重や慣性分を差し引く必要があるが、各関節ごとにトルク制御ループを構成できるためアーム全体の高い位置決め精度や、高い応答性も期待できる。しかし、トルクセンサを各関節に配置しなければならず、構造もやや複雑になる [43, 44]。各関節を駆動するモータの電流値からトルクを推定する方法も考えられる。そこで Fig. 4.1 のように HELIOS IX のグリッパに 3 kg の重りを持たせ、roll 角を $-180^\circ \sim 180^\circ$ までゆっくりと数回往復運動させ、そのときの手首の 2 つのモータ Motor1, 2 の電流値を計測した。この 2 つのモータは、タイミングベルト (減速比 5:1) とハーモニックドライブ (減速比 100:1) とで 500:1 に減速され手首のリンクを駆動し、基準位置で PID 位置制御が行われている。この時の Motor1, 2 の電流値を Fig. 4.2 右に示す。Fig. 4.2 左のヤコビアンから求めた Motor1, 2 に作用するトルクの理論曲線に対して、Fig. 4.2 右は電流値が階段状に変化しており、軸受や減速機でスティックスリップ現象がおきていると考えられる。また、同じ roll 角において回転方向にの違いに

より電流値が異なるヒステリシスも確認できる。以上より、手首のモータの電流をトルクを推定し多軸アームの力センサとして利用することは難しいと思われる。

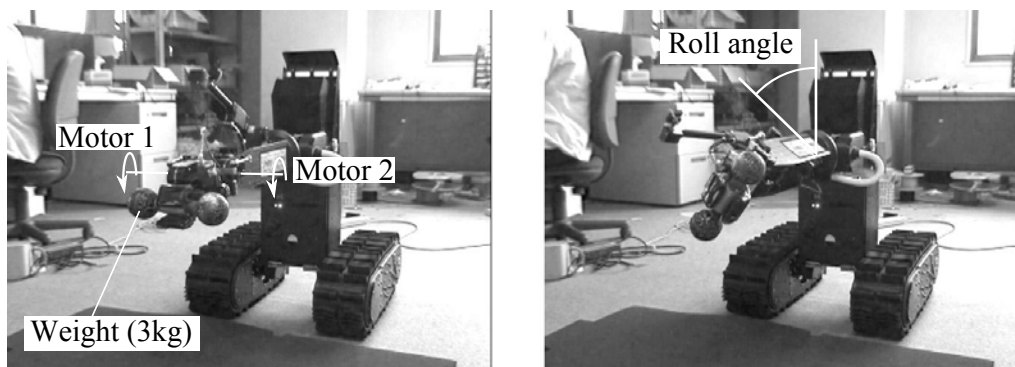


Fig. 4.1: Measuring wrist motors current.

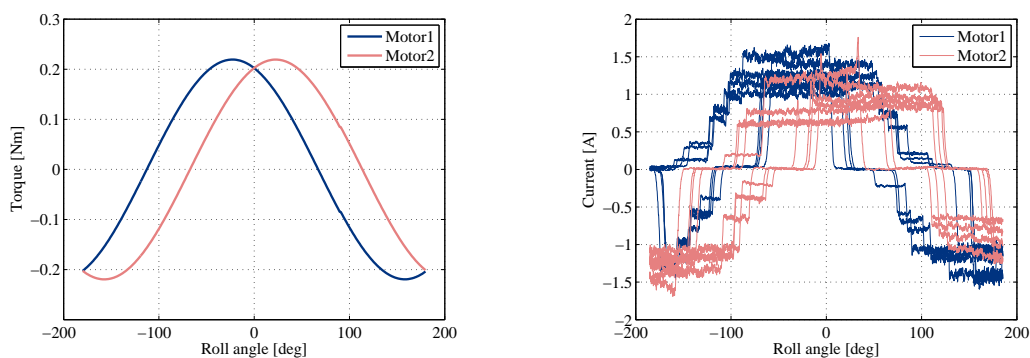


Fig. 4.2: Left: theoretical motor torque. Right: measured motor current.

4.1.2 手先の力センサ

この方法は手先に力センサを取り付けるだけでよく、リンクの自重の影響を受けないため、導入は容易である。これまでも、ロボットアームの手先に力センサを搭載し手先に加わる力を計測する研究は数多く報告されており、これらの多くは6軸力センサを使用している [45, 46]。本研究では市販されている中では比較的小型で軽量の6軸センサ (ミネベア OPFT-220N (Table 4.1)) と3軸センサ (ニッタ PD3-32-10-80 (Table 4.2)) を採用する。手首はできる限り重量が軽く、慣性が小さいことが望ましい。その点で本研究では、従来からよく使われている6軸タイプだけではなく、3軸タイプも HELIOS IX には導入することにした。まず、このような多軸力センサを導入するうえで有効な手法を提案する。その後これらのセンサを用いた制御法を検討していく。

Table 4.1: Specification of 6 axis force sensor (Minebea OPFT-220N)

| | | |
|-------------------------|---|-------|
| Diameter | | 50 mm |
| Weight | | 330 g |
| Load rating (force) | x | 220 N |
| | y | 220 N |
| | z | 440 N |
| Load rating (moment) | x | 11 Nm |
| | y | 11 Nm |
| | z | 11 Nm |

Table 4.2: Specification of 3 axis force sensor (Nitta PD3-32-10-80)

| | | |
|----------------------------------|---|---------|
| Diameter | | 18 mm |
| Weight | | 20 g |
| Load rating | x | 80 Ncm |
| | y | 80 Ncm |
| | z | 80 N |
| Displacement of edge of stick | x | 0.1 mm |
| | y | 0.1 mm |
| | z | 0.05 mm |

4.2 起歪体を用いた多軸力センサの測定範囲の補正方法の提案

手首に多軸力センサを取り付ける場合、多軸力センサは力が働く手先部からかなり離れた位置に取り付ける場合がほとんどである。例えば Fig. 4.3 左のように取り付けた場合、カセンサに作用するモーメント M は、

$$M = Fl_e \quad (4.1)$$

となり、 l_e が大きければカセンサが計測できる範囲は限られてしまう。そこで、この力作用点のずれによるモーメントの計測範囲の制限を補正するため、Fig. 4.3 右のように多軸力センサ外部にセンサと並行して付加的な起歪体を取り付ける構成法を提案する。この起歪体に力 F_k が作用するとすると、カセンサに作用するモーメント M は、

$$M = Fl_e - F_k l_e \quad (4.2)$$

となり、カセンサが計測できる範囲を補正することができる。以降で実際に起歪体を取り付けた 3 軸力センサを試作し HELIOS IX に取り付け、実験により提案する手法の有効性を確認していく。

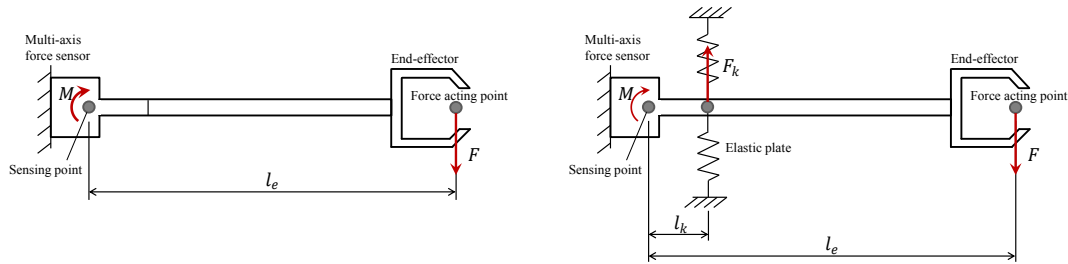


Fig. 4.3: Reinforced multi-axial force sensor with elastic plate

4.2.1 測定範囲を補正した 3 軸力センサの開発

導入する 3 軸力センサ (Nitta PD3-32-10-80) は、非常に小型・軽量であるが、そのままでは使用できない。それは、この 3 軸力センサは、 z 軸方向については力を計測するが、 x , y 軸方向についてはモーメントを計測するため、センサの中心から力の作用点が離れるほど計測できる力の範囲が小さくなるのが問題となっているためである。つまり、手首部に直接 3 軸力センサを取り付けた場合、実際の力の作用点は Fig. 4.4 のように約 130 mm 離れているため、市販のセンサそのままでは x , y 軸方向の測定範囲は大幅に低下してしまい、6.15 N までしか計測できないことである。そこで本研究では起歪体を新たに開発し、起歪体中心部を 3 軸力センサ入力軸とグリッパ間に固定し、かつ起歪体

周辺部を 3 軸力センサを支持するフレームに固定することで、外力を両方で支持するという新しい構成法を導入した。

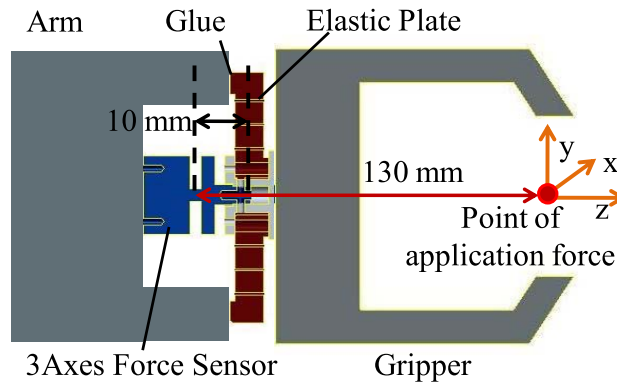


Fig. 4.4: Adding a elastic plate

起歪体の設計



Fig. 4.5: Developed elastic plate

起歪体の設計では材質はアルミニウムの A2017 を用いることとし、手先での目標力測定レンジを x, y 軸方向には 70 N とした。一方、 z 方向（圧縮・引張）は元々 80 N まで測定できるため、起歪体は x, y 方向には硬く z 方向には柔らかい特性を生成することとした。Fig. 4.5 に示すように起歪体は 90° 対称な形状とした。この起歪体の厚さや溝の幅などは、上述した目的の特性を生成するため、以下

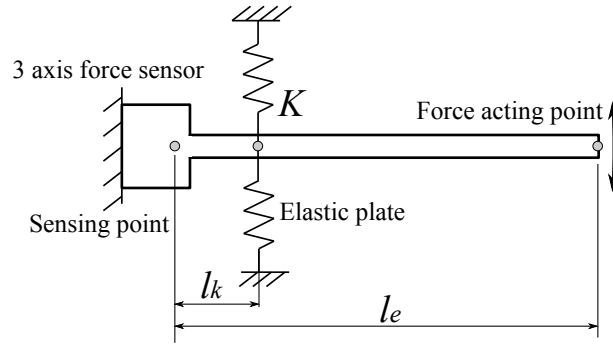


Fig. 4.6: Force sensor with elastic plate

に示すように x, y 軸回りのモーメント, z 軸方向の力の特性を構造解析ソフト (Pro/MECHANICA Wildfire 4.0) を用いて決定した. まず, x, y 軸について, Fig. 4.6 に示すモデルを用いて説明する. センサ中心からセンサの先端までの距離を l_k , センサ先端の最大変位を Δx_{max} , センサ中心から l_e だけ離れた力の作用点で計測できる最大値を f_{max} , 起歪体のばね定数を k , 力センサ自体のセンサの先端におけるばね定数を k_s とすると, センサ中心におけるモーメントのつり合い式より以下の等式が成り立つ.

$$(k_s + k) \Delta x_{max} l_k = l_e f_{max} \quad (4.3)$$

これを k について解き, $k = 8300 \text{ N/mm}$ となるように設計すればよいことがわかる. ただし各定数は ($l_k = 130 \text{ mm}$, $l_e = 10 \text{ mm}$, $\Delta x_{max} = 0.1 \text{ mm}$, $f_{max} = 70 \text{ N}$, $k_s = 800 \text{ N/mm}$) である. Fig. 4.7(a) は, 構造解析ソフト上で手先の位置である 130 mm 離れた点に 70 N 加えたときの結果を示し, このときに力センサのスティックの先端が 0.1 mm 変位することを確かめた.

z 軸方向については, 上記のように x, y 軸を調整したモデルに対して z 軸方向に 55 N を加えた時に, 定格の 0.05 mm 変位した Fig. 4.7(b). したがって, 力センサ自体の 80 N を加えて, 135 N まで計測可能となると予測される.

なお, このような力補助機構の構成において注意すべきことは, 取り付け時の内力の生成である. 力センサ PD3-32-10-80 は z 方向に定格荷重を受けた際の変位は 0.05 mm であり, また起歪体やセンサを取り付ける部品には加工精度が要求される. そのため, 起歪体をネジで固定すると内部力が生成されてしまうからである. この内部応力の発生を防ぐため, 筆者らは起歪体の周辺部と 3 軸力センサを支持するフレームとの間に微小な間隔を確保し接着剤でその間隔を埋めることとした (Fig. 4.8).

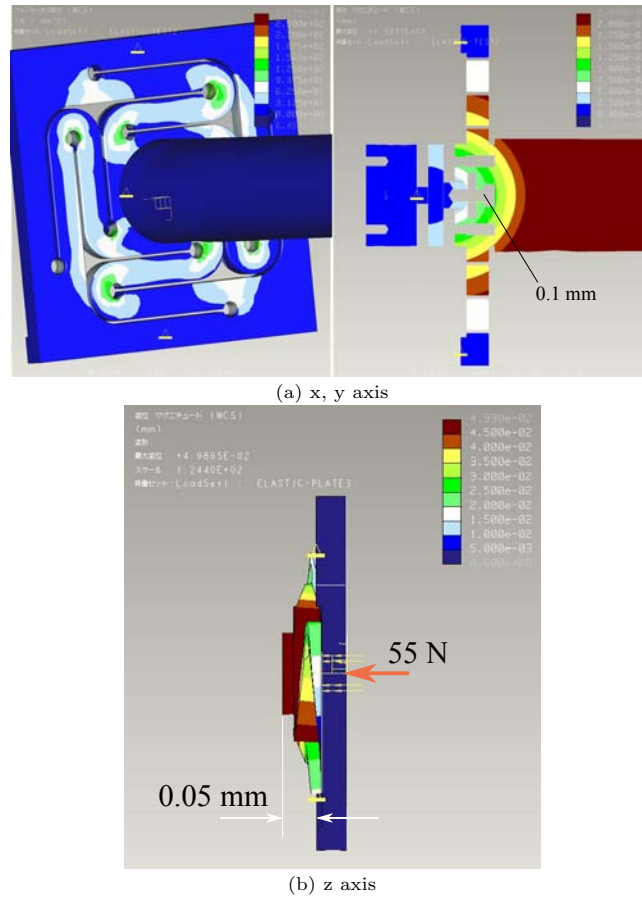


Fig. 4.7: Result of displacement analysis

性能評価

開発した指先センサの性能を検証するため、 x , y , z の各軸方向へ力を加え、力センサの出力を計測した。Fig. 4.9 に示す通り、補正により x , y 軸の測定範囲のみが拡張され、 z 軸はほぼ補正前のままという所望の特性が得られた (Table 4.3)。このように離れた点に働く力であっても、手元に作用点が存在するのと同様に力を計測することが可能となった。

4.3 力制御方法の検討

マニピュレータの位置決め誤差に対処しながら、対象物との接触を伴う作業を行なうためには、力制御の技術が有効であり、これまで様々な力制御法の研究が行われている [47]。それらの中で、環境に固定された対象物を把持する作業において有効な制御則として、ダンピング制御がある [48]。これ

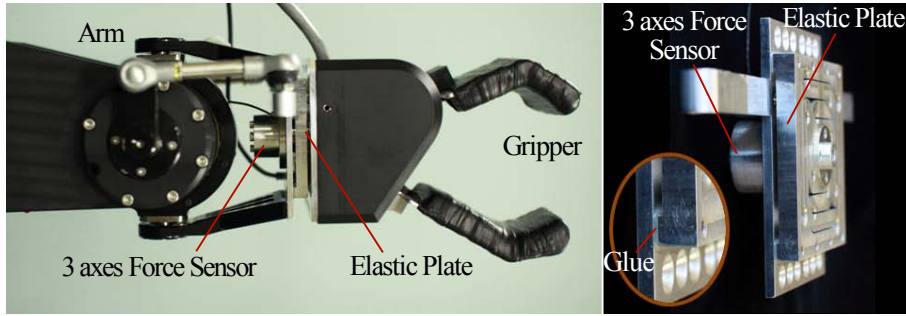


Fig. 4.8: Assembled force sensor and elastic plate

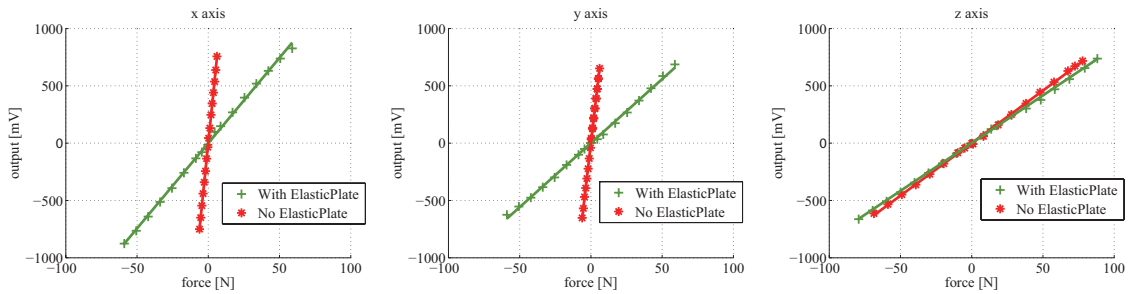


Fig. 4.9: Outputs of the force sensor while exerting a force on each axis

Table 4.3: New measurement range

| Load Rating | Original range | New range |
|-------------|----------------|-----------|
| x | 6.15 N | 50.5 N |
| y | 6.15 N | 58.9 N |
| z | 80 N | 88 N |

は力の加わった方向へ手先の目標位置を移動させるという制御則によってアームにかかる余計な力を逃がし、対象物にならう動作を可能とするものである。実際に文献 [49] では、移動マニピュレータがドアノブを把持する動作の際に、この手法が用いられている。

ダンピング制御は具体的には、力センサの出力である力、トルクベクトル F_l , τ_l に地球座標から力センサ座標までの回転行列 R を乗算して、地球座標を基準とした力、トルクベクトル F , τ を求める。

R は各関節の現在値 θ を用いて計算する.

$$\mathbf{F} = R(\theta)\mathbf{F}_l \quad (4.4)$$

$$\boldsymbol{\tau} = R(\theta)\boldsymbol{\tau}_l \quad (4.5)$$

新しい手先目標位置 $\mathbf{x}_{ref}(t+1)$ と手先目標姿勢 $\boldsymbol{\theta}_{ref}(t+1)$ は、以下の式により求める.

$$\mathbf{x}_{ref}(t+1) = \mathbf{x}_{ref}(t) + (\dot{\mathbf{x}}_{operator} + K_f\mathbf{F})\Delta t \quad (4.6)$$

$$\boldsymbol{\theta}_{ref}(t+1) = \boldsymbol{\theta}_{ref}(t) + (\dot{\boldsymbol{\theta}}_{operator} + K_\tau\boldsymbol{\tau})\Delta t \quad (4.7)$$

ただし、 $\dot{\mathbf{x}}_{operator}$ は操縦者の指令速度、 $\dot{\boldsymbol{\theta}}_{operator}$ は操縦者の指令角速度、 K_f 、 K_τ はアドミッタンス行列、 Δt は制御周期である。そしてアームの逆運動学を解き、各関節の目標角度を求め各モータを駆動するものである。

ここで、前節で述べた起歪体により測定範囲を補正した 3 軸力センサを用いてこの制御則を実装し、その力センサと制御則の有用性を確かめる。そのための実験として、故意にグリッパの作業中心を固定した対象物の下方に設定して、操縦者はグリッパを閉じる操作で検証した。力情報を用いない場合、つまり位置制御では (Fig. 4.10(a)) に示すように手先部に上向きの大きな力が加わり、物体を把持できない。しかし、Fig. 4.10(b) では力センサの情報を用いて、手首の位置が力が加わった方向に自動的に移動し問題なく把持できることが確認できた。手首の移動速度は式 4.6 より力 F に比例し、Fig. 4.10(b) のグラフから $-x$ 方向と $+z$ 方向に動いたことが確認できた。なお、30 ms ごとにロボット内部のマイクロコントローラで式 4.4、4.6 の計算を行っている。このように起歪体を取り付けて測定位置を遠方に移した小型軽量な力センサの情報により位置を補正することで、操縦者の雑な把持操作でも HELIOS IX は安定した把持動作が可能となることが確認できた。

ドアを開ける際には、余計な力を逃がしながらも、回転軸の周方向へはある程度力を発揮する必要があるため、アドミッタンス行列 K_f 、 K_τ を変化させる必要がある。詳細は 7 章で述べる。

4.3.1 力情報の提示

計測した力情報を操縦者へ視覚的に提示するため、本研究では Fig. 4.11 に示すように手首の位置から伸びている球で力ベクトルを画面上に表す方式を導入した。

4.4 まとめ

本章では手先にかかる力を計測しアームにかかる余計な力を逃がすための、力センサの構成と制御方法を検討した。手首に装着した多軸力センサは、実際に力が働く手先部からかなり離れた位置に取り付ける場合が多い。この力作用点のずれの影響を補正するため、多軸力センサ外部にセンサと並

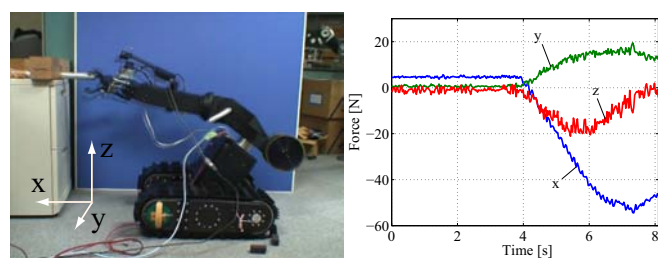
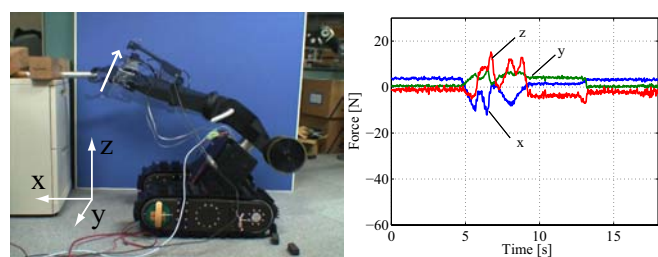
(a) Without force feedback ($K_f = \text{diag}(0, 0, 0)$ [(mm/s)/N])(b) With force feedback ($K_f = \text{diag}(6.8, 6.8, 6.8)$ [(mm/s)/N])

Fig. 4.10: Experiment of grasping objects



Fig. 4.11: Force vector displayed in GUI

行して付加的な起歪体を取り付ける構成法を提案した。そして、実際に起歪体を取り付けた 3 軸力センサを試作し、それを HELIOS IX に装備して動作実験を行い、提案する多軸力センサ構成法とその力制御法の有効性を検証した。

第5章 HELIOS IXのクローラ移動性能の向上

HELIOS IXは、アームの第一関節が左右のクローラの中心部にそれぞれ独立したアクチュエータにより連結された形態をしている。このような形態を特徴とする HELIOS IX の不整地走行の実現には、その独特の形態のための制御手法が必要である。その制御手法としては、左右のクローラを地形に対応して変形させ、中央のアーム機構をフリッパとして活用しながら移動する方法である。まず、そのフリッパの形状の検討を行い、ついでクローラを地形に対応して変形させる制御法を検討する。

5.1 そり

クローラは対地適応性に優れ、多少の凹凸であれば、それだけでも踏破することができる。しかし、クローラより高い障害物を乗り越えることはできないため、補助フリッパアームを装備したものが多く報告されている。また、文献 [50] では、尾のような機構を取り付けて車体長を延長し階段昇降時に転倒を防ぐ手法が提案されている。

2章でアームに取り付けられた受動車輪をフリッパアームのように地面に押し付けることで階段昇降が可能であることを述べたが、アームを階段の形状に合わせて操作する必要があり、そのためにカメラの視点も変化してしまうことが問題であった。これらの問題を解決するためには車輪のような円弧ではなく、平坦な形状が望ましいと思われる。平坦な構造として、能動または受動のクローラとすることも検討したが、軽量で構造も簡単な「そり」のような機構とした (Fig. 5.1)。底部にはテフロンシートを取り付け摩擦を軽減し、その上部にはアームを駆動するためのバッテリー (24V, 10Ah) を配置している。これを用いた階段昇降実験や受動車輪との比較については 8.1 節で述べる。

5.2 対地適応動作

いくつかのフリッパアームを装備したクローラロボットは不整地踏破能力の向上と操縦者の負担を減らすため、地形に合わせて自律的にフリッパアームを動作させている。文献 [51] では、ロボット側面や前方に取り付けられたレーザレンジファインダから周囲の地形データを計測し、ロボットの姿勢を保つように 4 つの独立したフリッパアームの動作を自動的に決定している。文献 [52] ではフ

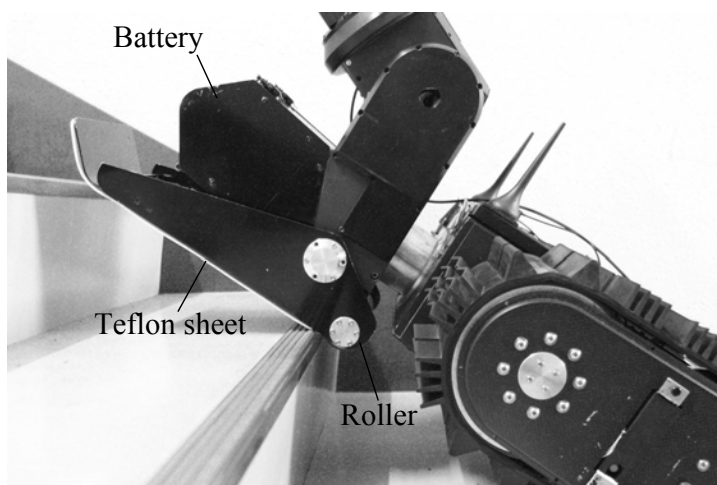


Fig. 5.1: Sled

リップに作用するトルクを計測し、その符号から地面との接触を判定し自動的に地形に沿わせるようにフリッパを動作させている。

HELIOS IX と近い形態として、文献 [53] では4つのクローラから成り、クローラの揺動回転軸が中心部にある形態が提案されている (Fig. 5.2)。各揺動回転軸にはトルクセンサが取り付けられており、地表の多少の凹凸はトルクをゼロに制御することで吸収できる。また大きな凹凸に対してはCarrierを水平に保つように能動的に駆動することで対応している。HELIOS IX の場合には、Fig. 5.3 に示すようにクローラを揺動させる回転軸はアームの第一関節も兼ねた構成のため、従来のこれらの方法をそのまま適用できない。

また、文献 [54] では、車体に対して左右のクローラを差動機構で連結することで凸凹の地形に対応している。しかし状況によっては能動的に左右のクローラのアームに対する角度を能動的に制御することも必要となる。

ところで、アームは τ_{1L} と τ_{1R} の和により支持されている。そこで、 τ_{1L} と τ_{1R} の差に注目し、Fig. 5.4 左に示すように左右のクローラを仮想的にバネ k とダンパ c で連結したモデルを導入することによって、アームの自重を補償しつつ地形に適応できると考えられる。加速度は無視できるものとする、以下の式が成り立つ。

$$-(\tau_{1L} - \tau_{1R}) = k(\theta_{1L} - \theta_{1R}) + c(\dot{\theta}_{1L} - \dot{\theta}_{1R}) \quad (5.1)$$

具体的な制御方法を以下で述べる。

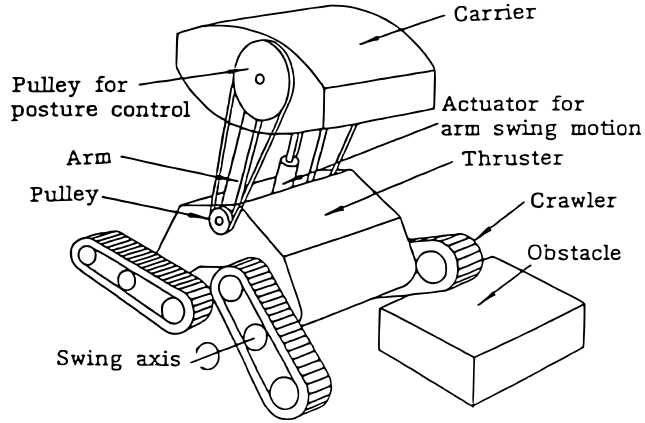


Fig. 5.2: The configuration of the tracked vehicle HELIOS II using four equilibrium crawler

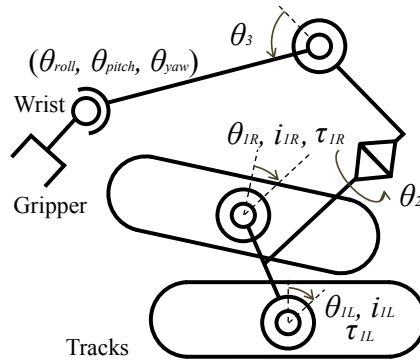


Fig. 5.3: Definition of joint angle

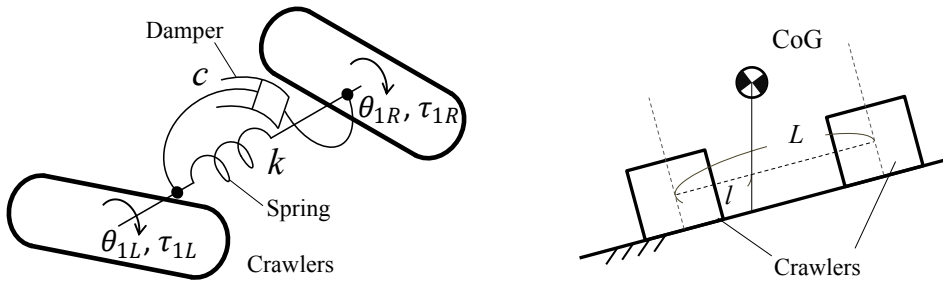


Fig. 5.4: Crawlers model connected with spring and damper

5.2.1 トルクの計測と制御

上記の HELIOS IX 用クローラ制御法を導入するためには、クローラが受けるトルクを計測する必要がある。トルクセンサを取り付けた例 [53] もあるが、本研究では実用性を重視しシンプルにモータの電流からトルクを推定することとした。クローラを揺動させる関節には、HiBot 社製 3 相デルタ結線の 100 W ブラシレス DC モータにハーモニックドライブ (減速比 1:160) を密閉型のケーシング内に組んだユニットを左右に 2 つ使用している。Hibot 社製のモータドライバを用いて、ホールセンサからの角度情報により矩形波を生成している。ブラシレス DC モータの出力トルクは DC モータと同様に電流にトルク定数を掛けることで推定できる。電流はモータドライバ内に取り付けられた 3 つの電流センサ (Allegro ACS712ELCTR-30A-T) により計測した。

基本的な制御の方針は、式 5.1 を $(\dot{\theta}_{1L} - \dot{\theta}_{1R})$ の項について解くことで左右の目標角度の微小変位を求め、目標角度を更新して行くこととした。しかし、Fig. 5.4 右に示すようにアームの各関節の角度やロボットの姿勢によって重心の位置が変化し、クローラが受けるトルクも変化するため、このことも考慮に入れる。アームの各節の重量は CAD から、ロボットの姿勢は右側のクローラ内部に取り付けた小型の 3 軸加速度センサ (ADXL345) と、3 軸ジャイロセンサ (ITG3200) を用いて重心の位置を求めた。以上のことから、左右の目標角度 $\theta_{1Lref}, \theta_{1Rref}$ は以下のようにした。

$$\theta_{1Lref} = \Sigma \Delta \theta_{1offset} + \theta_{1operator} \quad (5.2)$$

$$\theta_{1Rref} = -\Sigma \Delta \theta_{1offset} + \theta_{1operator} \quad (5.3)$$

ここで、

$$\Delta \theta_{1offset} = -k_{\theta}(\theta_{1L} - \theta_{1R}) - k_c(k_L i_{1L} - k_R i_{1R}) \quad (5.4)$$

$$k_L = l/L, \quad k_R = (L-l)/L \quad (5.5)$$

i_{1L}, i_{1R} は左右のクローラのモータに流れる電流、 k_L, k_R は式 5.5 に示すように重心の位置を考慮した重み係数、 k_{θ}, k_c は堅さを決定する定数、 $\theta_{1operator}$ は操縦者による角度指令値となっている。Fig. 5.5 にその流れをブロック線図で示しておく。目標角度はロボット内部の CPU(SH4) によって約 100 Hz で計算し、位置制御を行っている左右のモータドライバへ送信している。

5.3 まとめ

HELIOS IX の移動性能を向上させるための検討を行った。まず、中央のアーム機構のフリッパー部にそりのような機構を導入した。ついで、HELIOS IX の形態を活用した、左右のクローラが受けるトルクの差を制御することで対地適応動作を生成する手法を提案した。

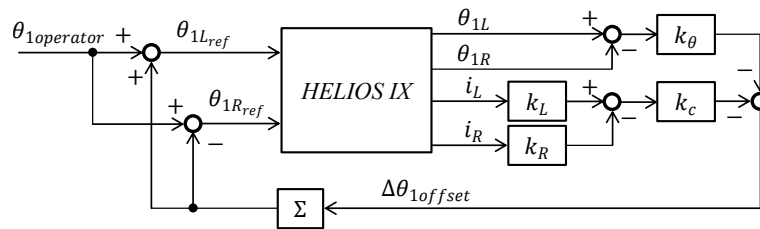


Fig. 5.5: Angular and torque difference between left and right tracks are fed back.

第6章 HELIOS IXの全体設計と開発

これまでの検討を踏まえ、開発した HELIOS IX の全体のハードウェア構成について述べる。

6.1 HELIOS IXの全景

Table 6.1 に HELIOS IX の寸法や重量などを、Fig. 6.1 に自由度配置を示す。

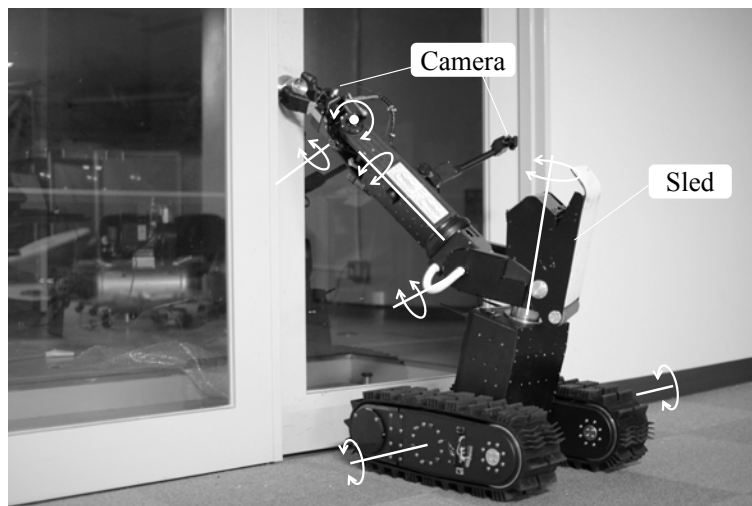


Fig. 6.1: Developed arm-equipped tracked vehicle HELIOS IX

6.2 クローラ・ユニット

HELIOS IX の移動機構として、軽量高性能クローラベルト (トピー工業との共同開発) と、当研究室で開発した 200 W ブラシレス DC モータと遊星歯車 (減速比 1 : 20) を潤滑油密閉型のケーシング内に組んだアクチュエータユニットで構成したクローラ・ユニットを採用した。このクローラ・ユニットの後方部にアクチュエータユニットとモータドライバを配置し、前方部に電源であるニッケル水素バッテリー (24 V, 4 Ah) を内蔵した。そしてクローラ・ユニット側面の中央部をアームのベース

Table 6.1: HELIOS IX Dimension

| Item | Value |
|---|--------------------|
| Width × Length × Height | 530 × 570 × 350 mm |
| Track unit (Width × Length × Height) | 160 × 570 × 202 mm |
| Arm (extended) | 1220 mm |
| Mass | 44 kg |

部 (能動関節) と接続している。また右側のクローラ・ユニットには、小型の 3 軸ジャイロセンサと 3 軸加速度センサを搭載した。



Fig. 6.2: Crawler unit

6.3 作業アーム

HELIOS IX の手首機構を含めた作業用アームを Fig. 6.3 に示す。Hibot 社製の 100 W ブラシレス DC モータにハーモニックドライブ (減速比 1:160) を密閉型のケーシング内に組んだモータユニットを第 1 関節は左右に 2 つ, 第 2, 第 3 関節には 1 つずつ使用している。メンテナンス性と故障の際の交換性を考慮して, アームのベース部には主計算機や無線 LAN 機器, 電源スイッチを搭載した。

6.4 カメラアーム

Fig. 6.4 に示すようにカメラアームは前腕部に取り付けられており, アルミパイプと固いコイルパネによって構成されている。このパネは障害物に接触した際の破損を防ぐ効果が期待できる。1 自由度のカメラアームの先端に CCD カメラと LED が小さなモータを介して取り付けられている。

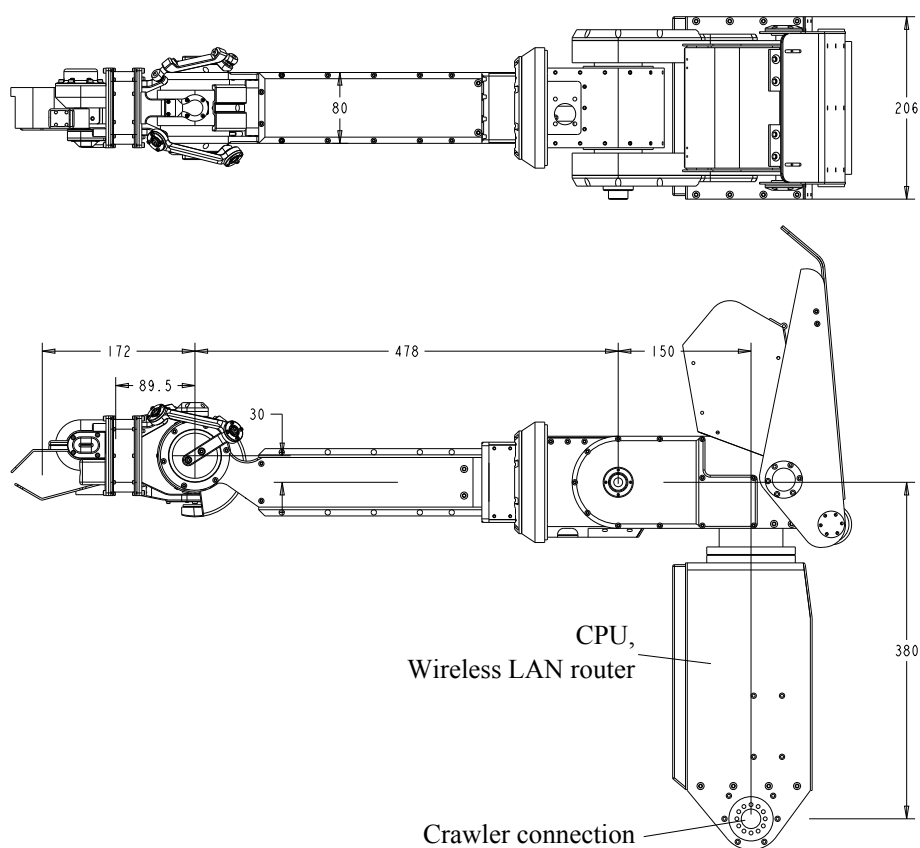


Fig. 6.3: Main arm dimension

6.5 手首機構

製作した手首機構の概観を Fig. 6.5 に、断面図を Fig. 6.6 に、諸元を Table 6.2 に示す。また、Fig. 6.7 に動作中の様子を示す。

6.5.1 中心負荷力支持性能

文献 [24] では 3 自由度球面リンク機構のベースとエンドエフェクタを球対偶で接続することによって、中心負荷力による各節の弾性変形を抑制できることを提案している。本研究の場合には機構中心部のユニバーサルジョイントがその役割を果たす。このユニバーサルジョイントは、pitch 軸を 4 点接触玉軸受、yaw 軸を上下に 2 つの深溝玉軸受により構成されている。これらの軸受けの静定格荷重は 2000 N 以上であり、外部から手先に加わる中心を通る大きな力を支持できる。このユニバーサルジョイントの効果について確認するため、Fig. 3.4 から中心部のユニバーサルジョイントを取り除い

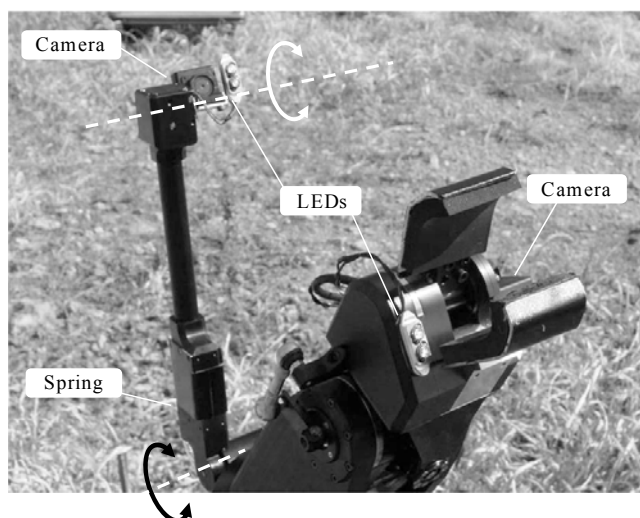


Fig. 6.4: Detail of the camera arm

たモデルを考える. この構成は x 軸周りのモーメントを受けることができないため機構としては成り立たないが, 以下の条件を設定し対偶に作用する力とモーメントを求めた. 受動対偶は全て回転対偶とし, リンク長は実物と同じ, 手先の姿勢は $(\theta_{pitch} = 0, \theta_{yaw} = 0)$ とする. x 方向に $F = 2000$ N の外力が加わり, 左右のリンクに均等に荷重がかかったとする. この時, 対偶 v_L, v_R に作用する力とモーメントは 1000 N, 54 Nm となり, これを支持するためには, 例えば, 深溝玉軸受 (内径 17 mm, 外径 30 mm, 幅 7 mm) を 2 つ 25 mm の間隔をあけて配置したような大きな関節となってしまう. このことから, 中心部のユニバーサルジョイントが有効であることが確認できた.

6.5.2 中心部の構造

手首機構の中心部には, ハーモニックドライブに直結する 2 つの扁平型のブラシレスモータが向かい合わせに配置され, 左右のリンクを駆動する. これらのアクチュエータ類の防塵防水性を確保するため, ハーモニックドライブの出力シャフトには V-ring を, その外側の部品の連結部には O-ring を配置する. さらにその外周部に, Fig. 6.8 のように 3D プリントで製作した硬質ゴムの部品を取り付ける. これは pitch 軸の回転と連動し, 地面を押す際に手先やリンク機構の破損を防ぐ. また, このゴムの部品は力が加わえられると変形し, 手首の前腕部側と接触することでモーメントも受ける.

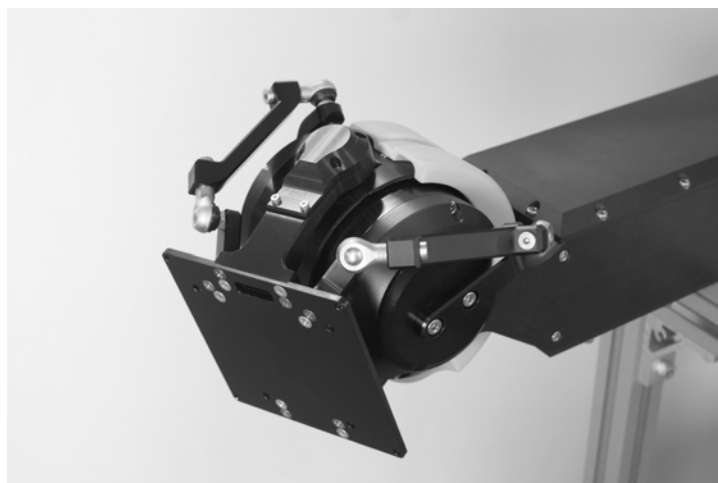


Fig. 6.5: Developed wrist mechanism

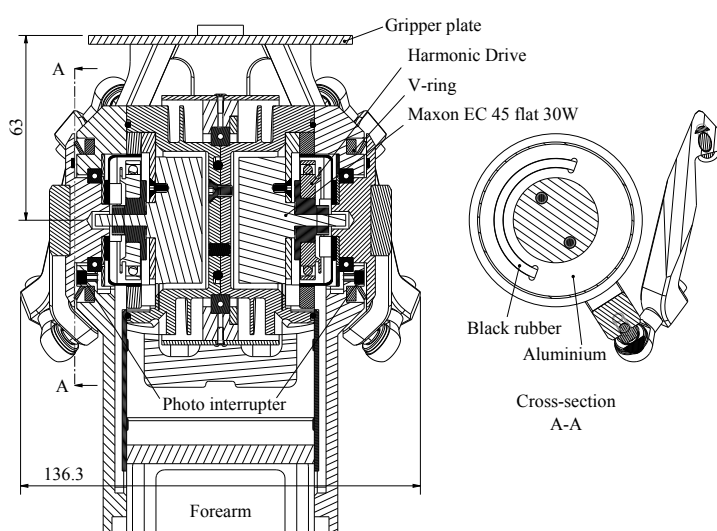


Fig. 6.6: Cross-section of the wrist mechanism

6.5.3 可動範囲

yaw 方向の可動範囲は、第 3.4 章で述べたように最大化を行い $-75^{\circ} \sim +75^{\circ}$ である。pitch 方向については部品同士の干渉によって制限され、前腕部とアクチュエータ類を収めた中心部との間のスペースに手先部の一部が収まるようにすることで、最大で $-120^{\circ} \sim +100^{\circ}$ と大きな可動域を実現した。CAD データから機械的な干渉も考慮した可動範囲は、Fig. 6.9 の実線の内側である。安全性を

Table 6.2: Specification

| Item | Value |
|--|--|
| Weight | 2.3 kg (including forearm) |
| Degree of freedom | 2 |
| Workspace | $-120^\circ \leq \theta_{pitch} \leq 100^\circ$ $-75^\circ \leq \theta_{yaw} \leq 75^\circ$ |
| Actuator | Brushless DC motor 30 W |
| Reduction | Harmonic Drive (Ratio: 1/100) |
| Output torque (at $\theta_{pitch} = \theta_{yaw} = 0$) | Pitch : 7.8 Nm Yaw : 9.8 Nm |
| Link parameters | $l_1 : 42^\circ, l_2 : 74^\circ, l_3 : 50^\circ, \alpha : 40.8^\circ$ |

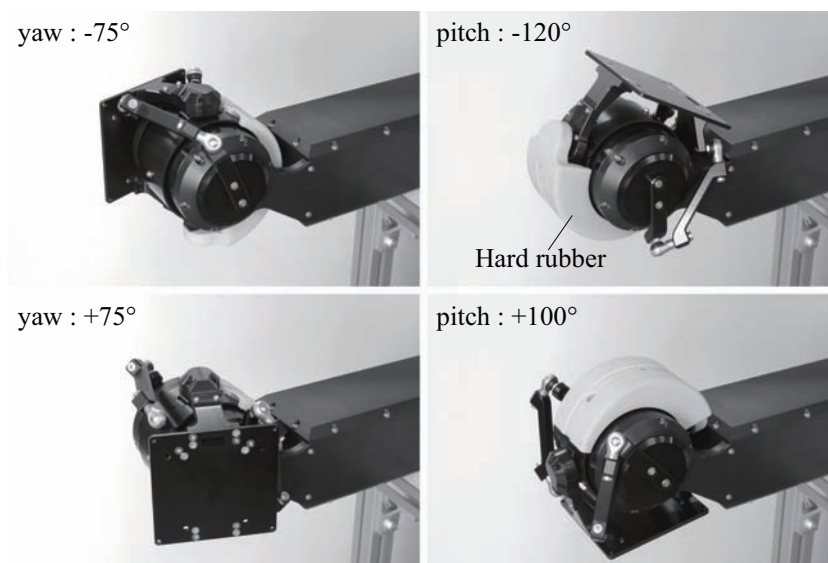


Fig. 6.7: Wrist motion test

考慮して目標値が破線内に収まるようにソフトウェアで制限を設けた。そのソフトウェアの制限に対応する左右の原動節の角度 θ_L, θ_R の可動範囲は Fig. 6.10 の実線の内側となっている。

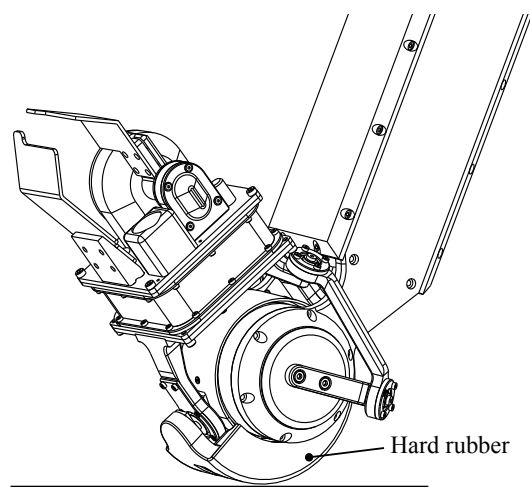


Fig. 6.8: Pushing ground

6.5.4 配線の取り回し

手先からの配線の取り回しは、文献 [55, 56] の手法を用いて全て機構の内部を通過させる。前腕部からの配線をらせん状の溝が切られたモータの外側の部品に 1, 2 周巻きつけてから手先部へ接続する (Fig. 6.11)。こうすることで手首の pitch 軸周りの回転による配線経路の長さの変化を吸収し、手首の運動を妨げない。

6.5.5 駆動リンクの角度の初期化

駆動リンクの角度をブラシレス DC モータに内蔵された矩形波駆動用のホールセンサから算出するため、初期化が必要である。その方法としてアブソリュートエンコーダやポテンショメータを取り付けることが考えられるが、スペースの制約からそれは難しい。本研究では反射型フォトインタラプタ (Kodenshi SG-2BC) を Fig. 6.6 左側のように取り付け、反射板となるアルミの部品 (Fig. 6.6 右) の半周分にアルミと比較し低反射率の黒いゴムを貼り付けた。ゴムとアルミの境界を初期位置とし、初動時に反射の有無を判別してモータをこの境界の方向に動かすことにより、どのような姿勢からでも、アームが無理のない中立姿勢に向かって動いて初期化できるようにした (Fig. 6.12)。なお、アルミの部品には黒色アルマイト処理が施されており反射率の低下が心配されるが、表面処理をしていないものと同程度の反射強度が得られるため、問題はない。

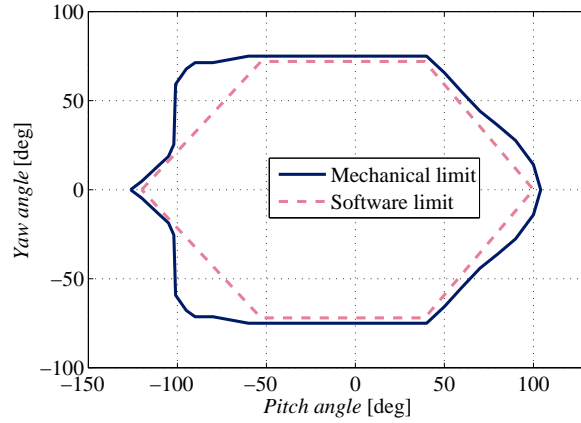


Fig. 6.9: Actual workspace of the wrist

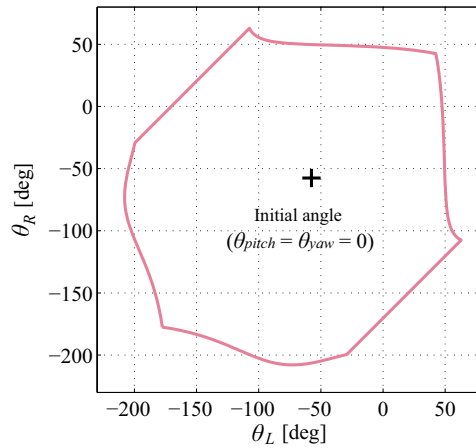


Fig. 6.10: Actual workspace of driver link

6.5.6 リンクパラメータのキャリブレーション

実際のリンクパラメータは加工誤差を含むため、キャリブレーションを行った。yaw 軸の角度を直接計測できるようにエンコーダを取り付け、Fig. 6.13 (a) のように動作させた。Fig. 6.13 (b) は、実際の yaw 角度と順運動学から得られる角度の差を示している。リンクパラメータとして設計値を用いた場合、 $\pm 70^\circ$ 付近で 1.2° の誤差が生じた。マニピュレータのキャリブレーションは様々な手法が存在するが [57]、ここでは単純に、4 つのリンクパラメータ (l_1, l_2, l_3, α) を設計値

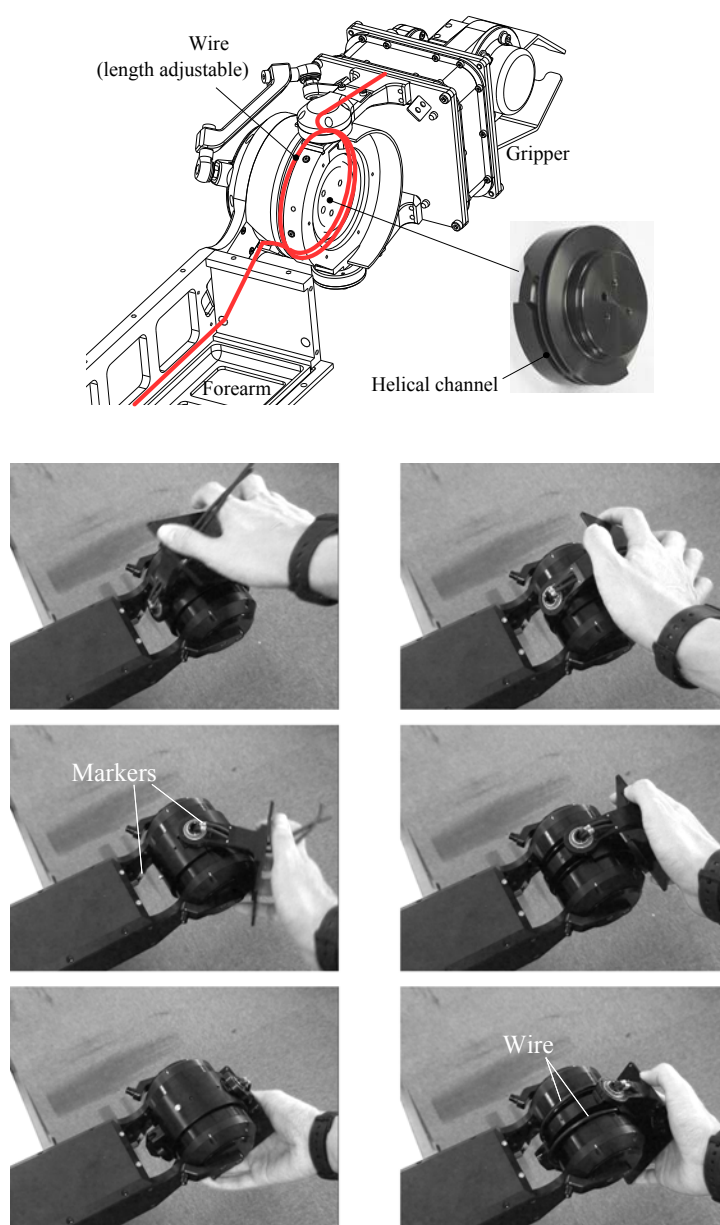


Fig. 6.11: Wiring to the gripper

($l_1 = 42.0^\circ, l_2 = 74.0^\circ, l_3 = 50.0^\circ, \alpha = 40.8^\circ$) から、各々 $\pm 1^\circ$ の範囲で 0.1° ごとに変化させ、順運動学解と実際の yaw 角との差の二乗和が最小となるリンク長の組み合わせをしらみつぶ的に探索した。その結果、($l_1 = 42.9^\circ, l_2 = 73.3^\circ, l_3 = 50.5^\circ, \alpha = 41.2^\circ$)で最小値となった。このキャリブレーション後の値を用いた場合、誤差は 0.4° 程に改善されることが確認できる。

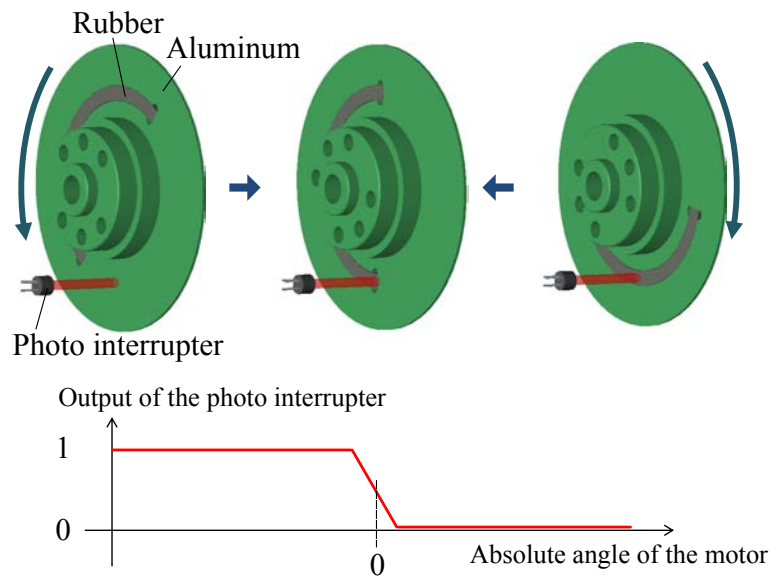
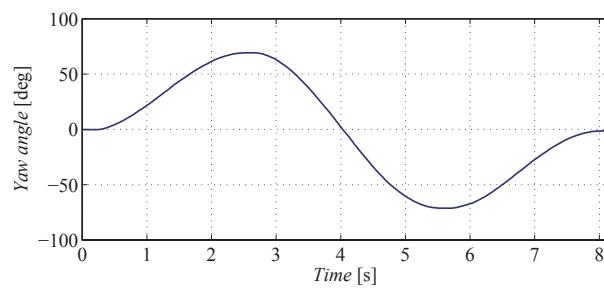
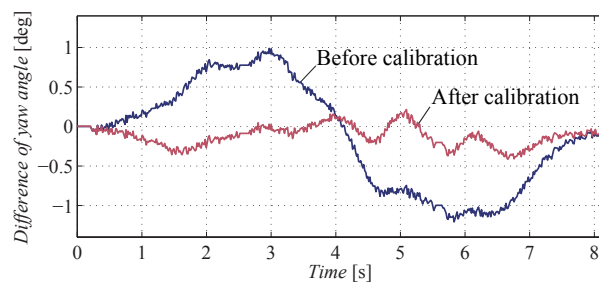


Fig. 6.12: Initialization of angle of driving linkage



(a) Yaw angle trajectory

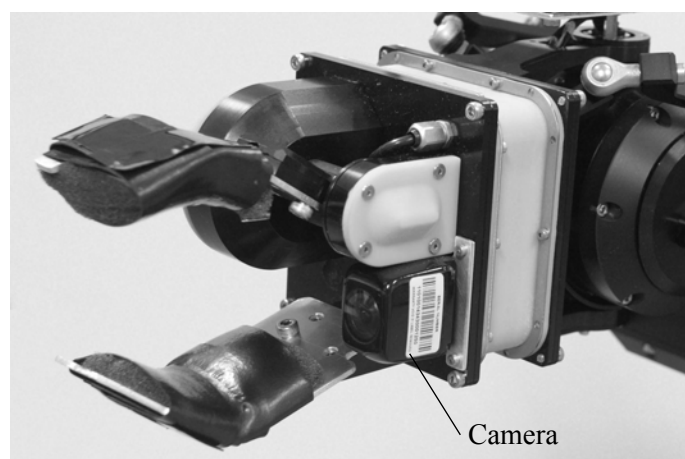


(b) Error of direct kinematics

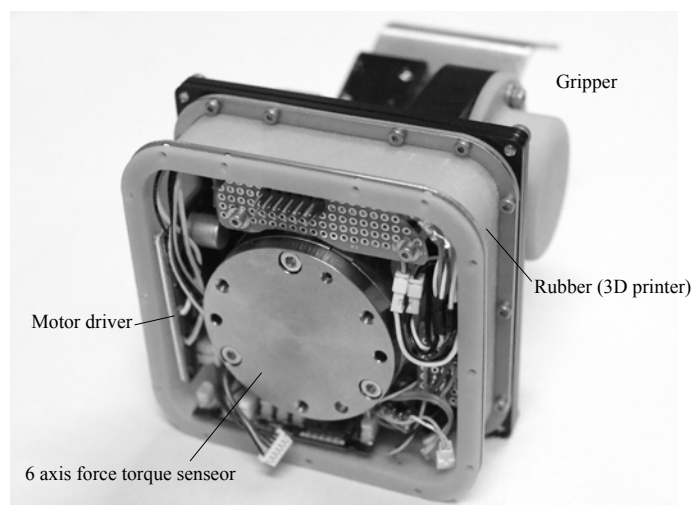
Fig. 6.13: Calibration of link parameters

6.6 グリッパ

手先部には6軸力センサ(ミネベア社 OPFT-220N)とその先に1自由度のグリッパが取り付けられている。カセンサとモータドライバなどの電子回路の周囲は、防水のため3Dプリンタ(Objet社)で製作したゴムの部品によりおおわれている(Fig. 6.14)。また、手首側の配線との結合はピンヘッドとピンソケットにより行われるため、手首とグリッパは容易に着脱が可能である。



(a) Front view



(b) Inside view

Fig. 6.14: Developed 1 DoF gripper

6.7 システム構成

システム構成は Fig. 6.15 のようになっている。各モータはマイクロコントローラ (SH2) を組み込んだモータドライバによって位置または速度制御されている。全てのモータドライバは CAN-BUS によって接続され、同じく CAN-BUS に接続されたメインのコントローラ (SH4) から指令角度を受信する。このコントローラは無線 LAN アダプタ (日本無線 JRL-720) を介して操縦者側の PC からコマンドを受信し、反対に操縦者側の PC へ各モータの角度、温度、電流値と力センサ、LRF の情報を送信している。同時にこうしたゲートウェイとしての役割の他に、クローラ内に取り付けた姿勢センサによってロボットの姿勢の推定やデッドレコニングの計算も行っている。また、2つのネットワークカメラの映像は無線 LAN アダプタを介して操縦者側の PC へ送られ、表示される。

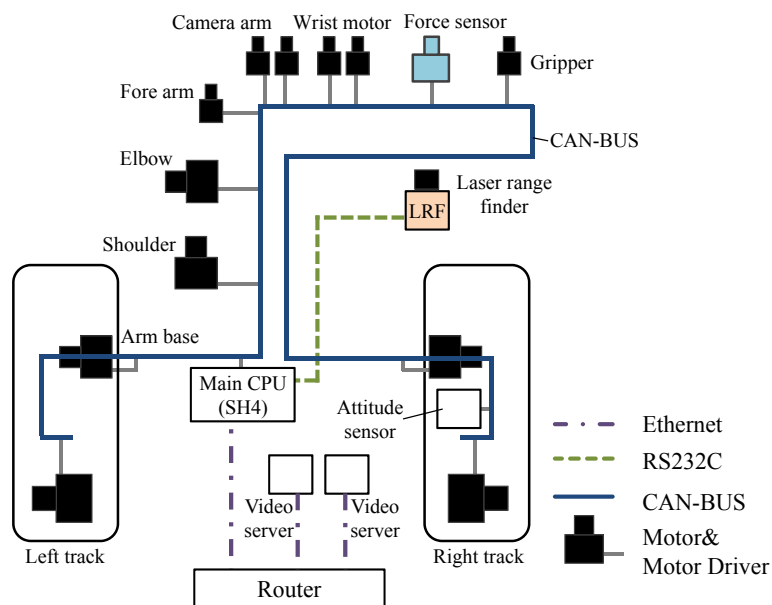


Fig. 6.15: HELIOS IX system architecture

6.8 まとめ

本章では、HELIOS IX 全体のハードウェア構成について述べた。特に手首機構は 3 章で提案した可動範囲最大化手法により、従来よりも大きな可動範囲を実現した。防塵・防水性、配線を全て機構内に収めていることなどの実用的な機能を持たせた試作機を製作し、リンクパラメータのキャリブレーションも行った。

第7章 Shared Autonomy 型遠隔操作系

完全な手動操縦では操縦者の負担が大きく、反対に、完全な自律動作では未知の環境で臨機応変に動作することは困難である。そこで、本研究ではアームを用いた物体のハンドリング、ドアやバルブの開閉作業等で、人間とロボットがお互いの長所を出し合いながら高い運動性と遠隔操作性を実現する Shared Autonomy の立場の制御系の構成を検討する。本章ではまず、HELIOS IX の基本的な手動操縦方法について説明し、その後、Shared Autonomy の実現例として、ロボットが取得した周囲の 3D 情報を用いて操縦者からロボットへ作業の教示を行うシステムについて述べる。

7.1 Shared Autonomy

第1章で述べたような未知の環境においては、いつどこで何をするかを事前に知ることはできない。したがって、ロボットが自律的に移動し作業を行うことは困難である。一方、人間が直接操作を行い完全操縦を目指した例は多く存在し、例えば文献 [15] では、遠隔操作型の双腕のマニピュレータをマスタースレーブシステムを用いて操縦し、ドアやバルブの開閉などを可能としている。しかし、比較的単純な作業であっても人が全て指示しなければならず、操縦者への負担が大きい。

このような操縦ロボットの問題を解決するため、自律行動と遠隔操縦を的確に組み合わせ操作性を拡張させる研究がなされている。これらの研究は Supervisory Control [58] や Shared Autonomy [59] などと呼ばれている。Supervisory Control は、人間はロボットの作業実行に対する監督者という立場をとり、作業計画や判断のような知識レベルは人間、作業実行のような動作レベルはロボット、などと人間とロボットで互いに得意とする部分を担当すべきである、という考え方である。主に時間遅れの大きいシステムに対して適用されている [60]。一方 Shared Autonomy では、人間とロボットが長所を出し合い自律行動と遠隔操縦でタスクを共有して共同で作業を行うものである。時間遅れが問題となる宇宙システムなどへの適用は難しいが、主な利点としては (1) 実行可能なタスク領域を拡大できる、(2) 人間の操縦ミス及びロボットの誤動作を低減できる、(3) 教示システムへの展開が期待できる、などが指摘されている。本論文では開発している HELIOS IX の機構的な特性を活かした直感的な遠隔操作法を検討し、上記の分類で言えば Shared Autonomy に分類される新しいマンマシンインタフェースのための有効なセンサ系の構成やユーザインタフェースを検討する。

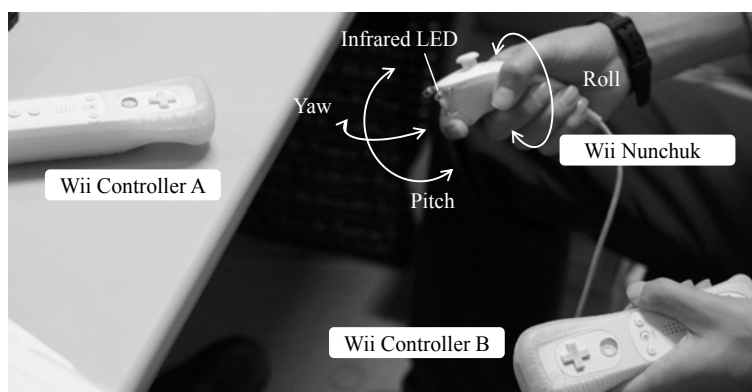


Fig. 7.1: Input device controller

7.2 手動操縦方法

オペレータが把持しやすい形状であり、加速度センサを内蔵して姿勢変化を感知するタイプであることから、安価なゲームコントローラ (任天堂 wii コントローラ) を使用して直感的に 6 自由度のマニピュレータとクローラを操作する構造とした。具体的には、Fig. 7.1 に示すように 2 つの Wii リモートコントローラと一つの Wii ヌンチャクを使用する。ヌンチャクに内蔵された姿勢センサの情報から、オペレータの手首の *roll*, *pitch* 角を得ることができる。また、*yaw* 軸はヌンチャクの前方に取り付けた 2 つの赤外 LED を Wii リモートコントローラ A の赤外線イメージセンサでによって捕えることで得られる。これらのオペレータの手首の姿勢を、ロボットの手首の姿勢に反映させる。アームの操作はジョイスティックにより手首の (x, y, z) 座標の速度を与えて逆運動学を解くことや、各関節角度を直接与えることで行う。クローラはアームの操作からモードを切り替えて、ジョイスティックにより操作する。モードの選択やグリッパの開閉、カメラアームの操作はコントローラ B 上のボタンを使用する。グリッパで対象物を把持したときに、その握力 (グリッパのモータの電流値) が一定値を超えると振動によって操縦者にそれを提示する。手首やアーム、クローラの操作において誤操作を防ぐため、コントローラ上のあるボタンを押しているときのみに有効となるようにした。

7.2.1 アームの操作

ヌンチャク上のジョイスティックにより手先の位置の x, y 座標を、コントローラ B のボタンによりの z 座標の速度を与えて、逆運動学を解き各関節の目標角度を求めることでアームの操作を行う。また、各関節角度を直接与えることも可能としている。アームの運動学については付録 A で述べる。

7.2.2 手首の操作

ヌンチャクに内蔵された姿勢センサの情報から、オペレータの手首の *roll*, *pitch* 角を得ることができる。また, *yaw* 軸はヌンチャクの前方向に取り付けた 2 つの赤外 LED を Wii コントローラ A の赤外線イメージセンサでによって捕えることで得られる。これらのオペレータの手首の姿勢を、ロボットの手首の姿勢に反映させる (Fig. 7.2).



Fig. 7.2: wrist control

7.2.3 クローラの操作

左右のクローラは内部のマイクロコントローラ内で速度制御を行っている。ヌンチャク上のジョイスティックを用いて、直進、その場旋回、カーブ (Fig. 7.3) が可能となるように左右のクローラの速度指令値を生成することにより、クローラを操作する。その指令値の生成方法について述べる。

ジョイスティックから得られる情報は倒した方向 θ と大きさ A である。 θ は Fig. 7.4 のように定義する。これら 2 つから左右のクローラに与える速度指令 (v_{Lref}, v_{Rref}) へ変換する方式を 2 種類考える。方式 1 ではジョイスティックを倒した方向によって連続的に直進、その場旋回、カーブと切り替わるようする。方式 2 ではジョイスティックを倒した方向 θ を 360° を 90° ずつ 4 分割し直進、後進、左右のその場旋回を割り当てた。2 つの方式はボタンを押すことで切り替え可能とした。

方式 1 カーブ

下の式のようにジョイスティックを倒した方向 θ から速度指令 (v_{Lref}, v_{Rref}) へ変換する。 A はジョイスティックを倒した角度に比例する定数とする。 θ によって連続的に直進、その場旋回、カーブと切

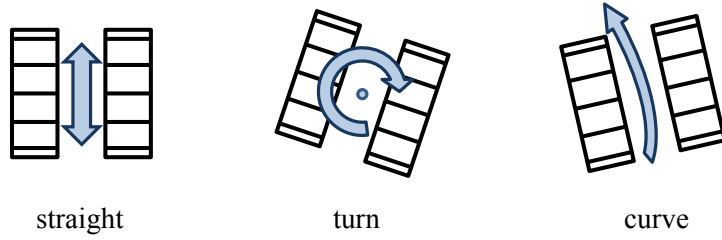


Fig. 7.3: required track motion

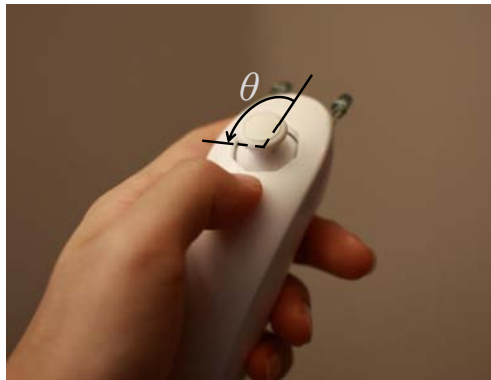


Fig. 7.4: joystick angle

り替わるようする.

$$v_{L_{ref}} = A \sin\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \quad (7.1)$$

$$v_{R_{ref}} = A \cos\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \quad (7.2)$$

方式 2 直進, その場旋回

方式 1 ではジョイスティックを真上や真横に正確に倒すのは難しく, 直進やその場旋回をすることができない. そこで, 左右のクローラの速度の絶対値を常に等しくしておき, 倒した方向 θ で符号を切り替えるようにした. 具体的には, Fig. 7.6 のように 360° を 90° ずつ 4 分割し直進, 後進, 左右のその場旋回を行う. また, 境目で不連続とならないように境目では速度が 0 となるようにした.

$$(0 \leq \theta < \frac{\pi}{4}) \mid (\frac{7\pi}{4} \leq \theta < 2\pi)$$

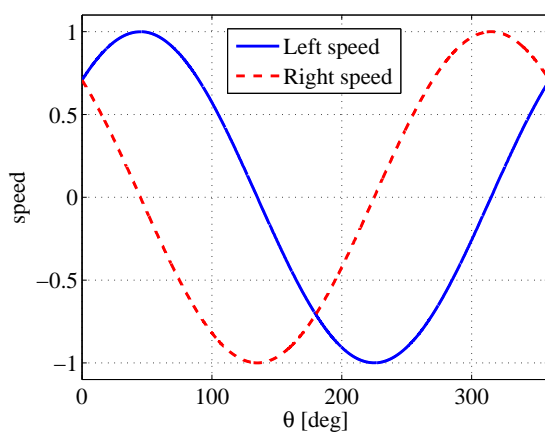


Fig. 7.5: method 1

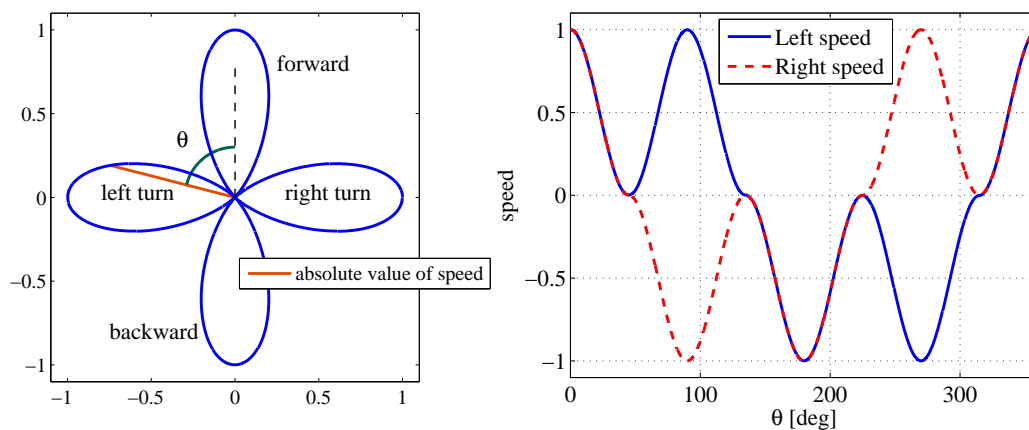


Fig. 7.6: method 2

$$v_{Lref} = A(0.5 \cos 4\theta + 0.5) \quad (7.3)$$

$$v_{Rref} = v_{Lref} \quad (7.4)$$

$$\frac{\pi}{4} \leq \theta < \frac{3\pi}{4}$$

$$v_{Lref} = A(0.5 \cos 4\theta + 0.5) \quad (7.5)$$

$$v_{Rref} = -v_{Lref} \quad (7.6)$$

$$\frac{3\pi}{4} \leq \theta < \frac{5\pi}{4}$$

$$v_{Lref} = -A(0.5 \cos 4\theta + 0.5) \quad (7.7)$$

$$v_{Rref} = v_{Lref} \quad (7.8)$$

$$\frac{5\pi}{4} \leq \theta < \frac{7\pi}{4}$$

$$v_{Lref} = -A(0.5 \cos 4\theta + 0.5) \quad (7.9)$$

$$v_{Rref} = -v_{Lref} \quad (7.10)$$

その他の操作

モードの選択やグリッパの開閉, カメラアームの操作はコントローラ B 上のボタンを使用する. グリッパで対象物を把持したときに, その握力 (グリッパのモータの電流値) が一定値を超えると振動によって操縦者にそれを提示する. 手首やアーム, クローラの操作において誤操作を防ぐため, コントローラ上のあるボタンを押しているときのみ有効となるようにした.

7.3 3D 情報を用いた操作系の導入

Shared Autonomy の一つの例として, 文献 [59] で提案されたロボット動作にソフトウェア的に拘束を与えて操作を容易にするというコンセプト”Software Jig” と呼ばれるものがある. この拘束の与え方として, まず PC の画面上で 7.3.1 節で述べるロボットに搭載した 3 次元距離センサにより作成した 3D 環境マップの画面上の所望の位置を 1~3 点クリックして座標を指定し, 指定した点の数によって 3 次元空間上に

1 点 その 1 点の空間座標

2 点 線分 (空間ベクトル)

3 点 空間内の平面

を定義し, これらの情報を利用して実作業対象へのロボットに与えるべき動作を効率的に生成する手法を導入する. 従来これに類する研究はいくつか行われており, 文献 [61] ではステレオカメラにより取得した 3D 情報を用いて, 画像上の数点をクリックして座標を指定しコップやボトルを把持する手法を提案している. 文献 [62] では, 1 次元のレーザー距離計をアームの先端に取り付け, レーザーを作業対象物へ照射し座標を指定する方法を提案している. 車いすにそのアームを搭載し日常生活動作を補助する応用が考えられており, 操縦者は直接環境を見ながらレーザーで対象物を選択するためにアームを操作する. しかし, これらの研究では, 概念の提案と簡単な動作実験が行われたのみで,

HELIOS IX のような、遠隔操縦型の移動作業ロボットのために、操作者の遠隔操縦性を高めるための検討は、まだ行われていない。本研究では、「対象物への接近」、「回転操作」、「手先の姿勢の保持」にこの手法を導入し、4章で説明した力センサとも組み合わせる。また操作にかかる時間からその評価も行う。まず、3次元距離の計測方法について説明し、その後3つの具体的な方法について述べる。

7.3.1 3次元距離の計測

3次元相対位置を計測する機器としては、レーザレンジファインダ (LRF) や、ステレオカメラが挙げられる。ステレオカメラは距離情報と共に色情報も得られるが、HELIOS IX の運用では測定精度・分解能・実時間性・価格等の点で優れる LRF を今回は選択した。本研究では入手しやすく、軽量・小型の LRF である北陽電機社製 URG-04LX を HELIOS IX の手首に搭載することとした (Fig. 7.7, Table 7.1)。そして、2次元センサであるこの LRF のスキャン動作を手首関節の回転と組み合わせ、3次元のスキャンを可能とし容易に様々な位置と姿勢からスキャンできるようにした。このとき、文献 [63] で報告されている手法と同様に、LRF 内部の時計と手首を駆動するコントローラ (SH2) 内の時計とを同期させ 3D マップの精度を高めている。具体的には、まず、LRF と SH2 の時刻差を調べるため、スキャン開始時にメイン CPU は、それぞれの時刻を LRF→SH2, SH2→LRF の順に2回問い合わせ、その平均値を LRF と SH2 の間の時刻差とする。1回目と2回目の差は約 10 ms であり、これは手首の角速度に比べて十分に小さいと言える。次に、手首を一定速度である角度まで回転させている間の時刻と位置を記録しておく。そして LRF から取得した座標データは、その時刻の関節角度を求めマニピュレータの順運動学を解き絶対座標系での座標を誘導した。

Table 7.1: Laser Range Finder (URG-04LX) specification

| Item | Value |
|--------------------|--------------------------------|
| Detection | 60 mm ~ 4095 mm |
| Accuracy | Distance 20 ~ 1000 mm : ±10 mm |
| | Distance 1000 ~ 4000 mm : ±1 % |
| Scan angle | 240° |
| Angular resolution | 0.36° (360°/1024) |
| Scanning speed | 100 ms/scan |
| Weight | 160 g |



Fig. 7.7: Laser Range Finder on the wrist

GUI の表示と座標の指定

GUI に, OpenGL[64] を利用し LRF による 3D マップ (Fig. 7.8 左) をカメラ画像 (Fig. 7.8 右) と並べて表示し, 操縦者が両方の情報を取得できるようにした. 操縦者は, マウスポインタを操作し様々な視点から 3D マップとロボットモデルを見ることが可能である. さらに OpenGL の機能を用いて操縦者がマウスポインタで 3D マップ上の点をクリックし, その座標を取得できるようにしている. 具体的な方法を以下に示す.

いま, LRF の 1 度のスキャンで n 個の距離データを取得し, 手首角度を変えながら, m 回スキャンしたとすると, m 行 n 列のデータを得られる (Fig. 7.9). k 番目の四角形の右上の点の座標は,

$$\left(\frac{k-1}{n-1}, (k-1)\%(n-1) \right) \quad (7.11)$$

で与えられる. マウスのクリックによって, 何番目の四角形が選択されたかを OpenGL の機能により取得できるため, その座標を計算することができる. このとき, 四角形の対角線の距離がある一定以上のときは不連続な点とみなして座標の計算から除外することとした.

7.3.2 対象物への接近動作

例えば, ボトルを発見した時それに手を伸ばして把持しようとする動作を遠隔操作で行おうとすると, 画像情報からでは距離感が得にくく困難な場合が多い. そこで本研究では, 操縦者が PC 画面上に映し出された対象物を様々な方向から見ながら, その対象物上の 2 点をマウスでクリックして

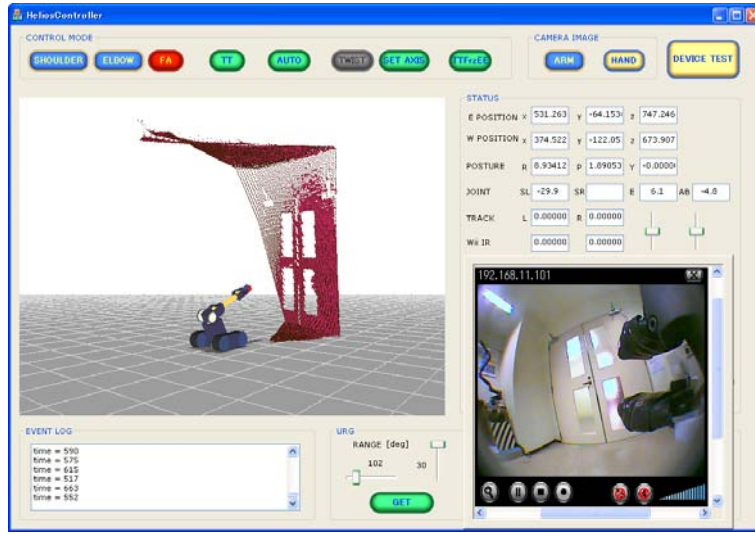


Fig. 7.8: Graphic user interface

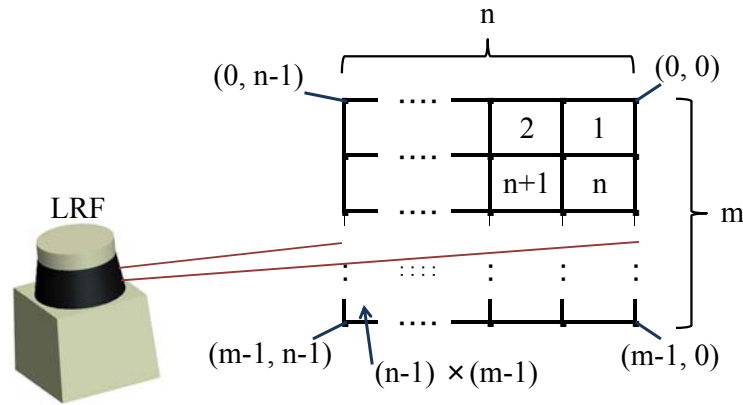


Fig. 7.9: LRF polygons

線分を定義する方法を導入する (Fig. 7.10 (c)). このようにすればボトルの位置と姿勢が分かるので、自動的にグリッパがその線分を把持しやすい姿勢でアームを接近させる動作が生成できる (Fig. 7.10 (b), (d)). Fig. 7.10 に示すように座標系を定義して、 T_X^Y は座標系 X から座標系 Y への同時変換行列とすれば、グリッパと定義した線分との相対位置は以下の式から求めることができる。

$$T_G^A = T_H^{G^{-1}} T_H^A \quad (7.12)$$

なお、HELIOS IX の移動速度は操縦者がジョイスティックで指定し、動作の状態の戻し、途中停止、

動作内容の修正も可能にした。

7.3.3 回転操作

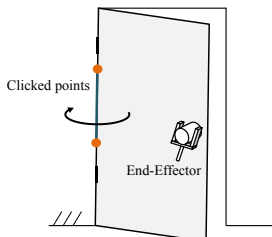
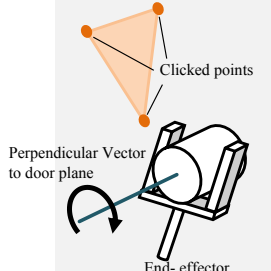
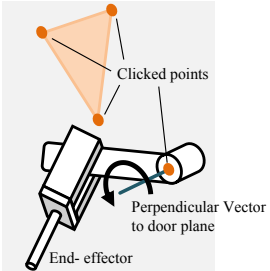
回転操作はドアやバルブを回転させる際などに行われる頻度の高い操作である。これまでロボットアームなどによるドアノブの回転を扱っている研究報告の多くは、ロボットアーム先端にロール自由度を配置し、このロール回転自由度をドアノブの回転軸と合わせて回転させるものであった [14, 45]。しかしノブがレバー型だと、レバーの先端を把持して回すことにより小さな力でノブを回せるが、ロボットによる上述の方法だとレバー型の利点が利用できない。また、HELIOS IX は手先にロール自由度がなく、さらにアームが十分な長さを有していないためドアノブを下から把持する必要がある。この状態からドアノブを回転させるにはアームの 6 軸を同時に動かす必要があり、従来の遠隔操作で行うのは容易でない。そのため本研究では、3D 距離情報を用いて回転軸をロボットに指示する Shared Autonomy な補助動作を導入することとした。Table 7.2 に示すように状況に応じて操縦者は、3D マップの 2-4 点をクリックすることで次のように回転軸を指示する方式を実現した。

2 点 2 点を通る線分

3 点 グリッパの中心を通過し、3 点で作られる平面に垂直なベクトル

4 点 4 点目を通り、1-3 点目で作られる平面に垂直なベクトル

Table 7.2: Direction of rotation axis

| Number of specified points | 2 | 3 | 4 |
|----------------------------|---|--|---|
| |  |  |  |
| Application | Opening door | Rotating cylinder-type Knob | Rotating bar-type Knob |
| Specified place | Hinge of door | Plane of door | Plane of door and center of knob |

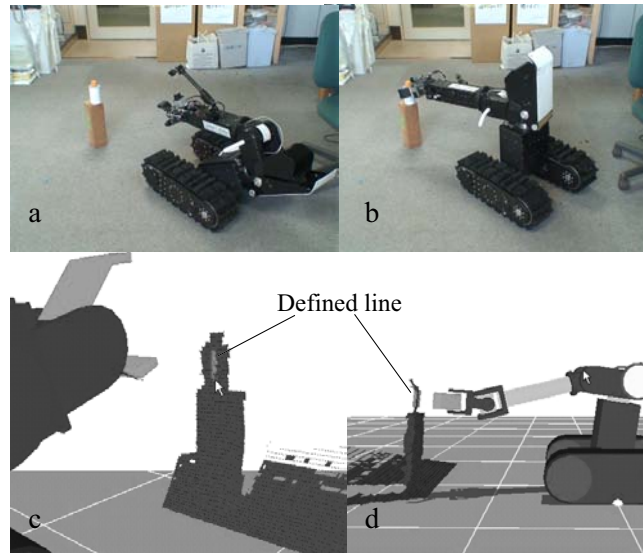


Fig. 7.10: Approaching the operator defined line

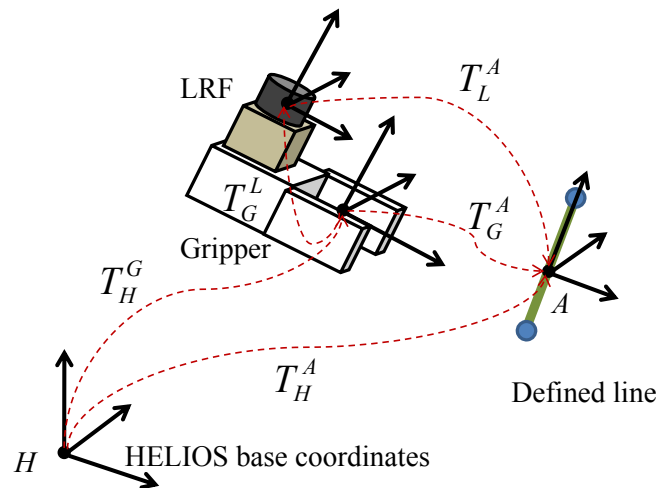


Fig. 7.11: Coordinates of the operator defined line

Fig. 7.12 は操縦者が見ているモニタであり, 円筒形のドアノブを回転させるためドアの平面を 3 点クリックし, ドアノブの回転軸を指示した様子を示している. このように回転軸を指示した後に操縦者が行うべき操作は, ジョイスティックを左右に動かす操作のみである. 6 自由度のアームの動作を指定した回転軸周りの 1 自由度に拘束することで操作者の負担を軽減することが可能である.

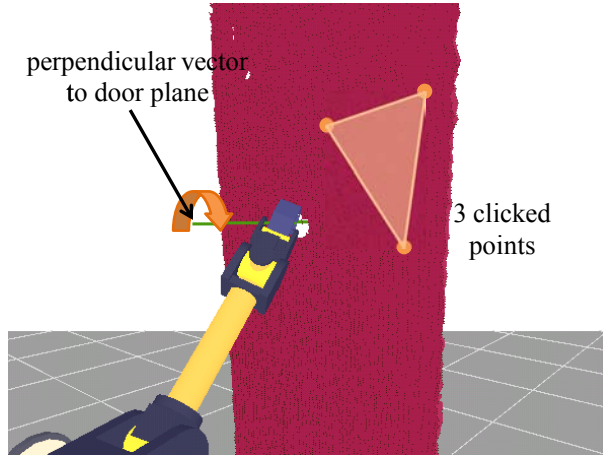


Fig. 7.12: Specifying the rotation axis

具体的な制御方法

以下に具体的な回転操作について, Fig. 7.13 を用いて説明する. まず, 指定した回転軸上に座標系 A を置く. 回転操作には座標系は必要ないが, コントローラの十字キーにより回転軸の位置の微調整するとき使用する. 回転軸と平行に x 軸を設定し, 次に y 軸を地面と水平になるようにし, 残りを z 軸とする. 座標系 A の原点は, 2 点指定した時にはその 2 点を通る直線上に (実装では 2 点目と一致), 3 点指定した場合はその時のグリップの中心座標に. 4 点指定した場合にはその 4 点目に配置した. 現在の手先座標系 G を, 設定した回転軸周りに $\Delta\theta$ だけ回転させ, G' になったとすると, その関係は以下の式で表すことができる. ここで, H はロボットのベース部に固定された座標系, T_X^Y は座標系 X から座標系 Y への, $R(axis, angle)$ は回転を表す同次変換行列とする.

$$T_A^{G'} = R(x, \Delta\theta)T_A^G \quad (7.13)$$

したがって $T_H^{G'}$ は次の式で表すことができるので, 逆運動学を解き各関節の目標角度が求まる.

$$T_H^{G'} = T_H^A R(x, \Delta\theta)T_A^G \quad (7.14)$$

微小回転角度を表す $\Delta\theta$ を操縦者がジョイスティックで与える. また, 回転操作中にコントローラ

の十字キーの左右を操作すると、回転軸上の座標系 A の原点は y 軸方向に移動し、上下の操作で z 軸方向に移動するようにすることで、操縦者が回転中心の微調整を行えるようにしている。

次に力制御方法について検討する。4章でダンピング制御を導入し対象物にならう動作を行えることを示した。しかし、ドアやバルブなどの回転操作ではその回転軸に対しトルク τ_a を発生させる必要がある。そのため手先に発生する力とトルクに対し、 τ_a に寄与する方向へは硬く（位置制御）、それ以外の方向へは柔らかく（ダンピング制御）なるようにアドミタンス行列を設定する。今、 τ_a に寄与する手先の力とモーメントをそれぞれ F_r, τ_r 、回転軸と手先位置との距離を d とすると以下の式が成り立つ。

$$\tau_a = |F_r|d + |\tau_r| \quad (7.15)$$

しかし、 F_r, τ_r の方向をともに位置制御とした場合、実際の回転軸との誤差のために矛盾が生じる可能性があるため、どちらかを選択する必要がある。例えば、Table 7.2 に示すようにドアの回転やレバー型のドアノブの場合、その回転軸と手先との距離が離れており、主に力を発生する必要がある。反対に円筒型のドアノブの場合にはトルクを発生する必要がある。そこで、回転軸と手先位置との距離 d によって、ある閾値 d_{th} を用いて以下のようにアドミタンス行列を設定する。

$$d > d_{th},$$

$$K_f = R_f \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_f & 0 \\ 0 & 0 & k_f \end{bmatrix} R_f^T, \quad K_\tau = \begin{bmatrix} k_\tau & 0 & 0 \\ 0 & k_\tau & 0 \\ 0 & 0 & k_\tau \end{bmatrix} \quad (7.16)$$

$$d \leq d_{th},$$

$$K_f = \begin{bmatrix} k_f & 0 & 0 \\ 0 & k_f & 0 \\ 0 & 0 & k_f \end{bmatrix}, \quad K_\tau = R_\tau \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_\tau & 0 \\ 0 & 0 & k_\tau \end{bmatrix} R_\tau^T \quad (7.17)$$

ここで、

$$d = |\mathbf{A}_x \times \mathbf{v}_{AG}| \quad (7.18)$$

$$R_f = \left[(\mathbf{A}_x \times \mathbf{v}_{AG}) / |\mathbf{A}_x \times \mathbf{v}_{AG}| \quad \mathbf{A}_x \quad ((\mathbf{A}_x \times \mathbf{v}_{AG}) / |\mathbf{A}_x \times \mathbf{v}_{AG}|) \times \mathbf{A}_x \right] \quad (7.19)$$

$$R_\tau = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_x & \mathbf{A}_y & \mathbf{A}_z \end{bmatrix} \quad (7.20)$$

ただし、 $\mathbf{A}_x, \mathbf{A}_y, \mathbf{A}_z$ は、回転軸上の座標系 A の x, y, z 軸ベクトル、 \mathbf{v}_{AG} は座標系 A の原点から手先座標系 G の原点へ向かうベクトルとし、いずれも座標系 H から見ているものとする。

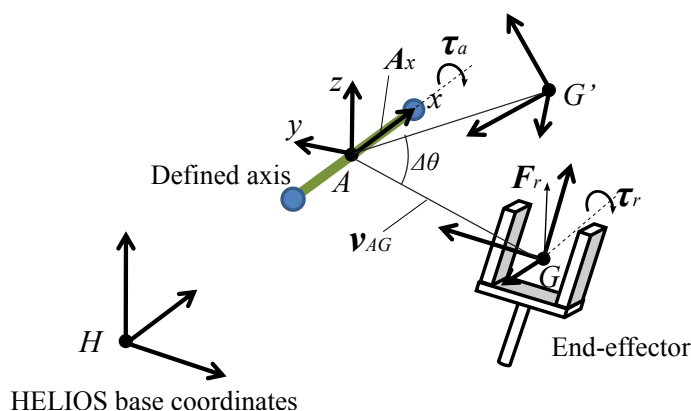


Fig. 7.13: Coordinates of rotation axis

7.3.4 手先姿勢の保持

ボタン操作やキーの挿入作業などにおいて、操作対象 (部品, 器具など) を一定の姿勢に保ちながら操作するという需要は高い. 文献 [59] で, マスタースレーブマニピュレータに対して, スレーブアームの姿勢をソフトウェアで一定に保つ拘束を与えることは, 水の満たされた容器の運搬作業において有効であることが実験的に示されている. ただし, その拘束の与え方は x, y, z 軸の中から拘束する軸を選択するという方式であり, 直感的ではなかった. 本研究では 7.3.3 節と同様の方式でベクトルを定義し, そのベクトル周り以外の回転指令を受け付けない方式を導入した. なお, この操作モードでのアームの操作などの基本的な操作方法は 7.2 節で述べた方法と同じである.

7.4 その他の操作補助

7.4.1 手先の絶対位置と姿勢を保ちながら移動

グローバル座標に対して手先の位置と姿勢を保ちながら, クローラで移動する操作モードを導入した (Fig. 7.15). この操作モードは, 倒れそうになっているものや閉まろうとするドアをアームでささえながら, クローラで移動する際に有効である. 操縦者は 7.2 節で示した方法と同様にしてジョイスティックによりクローラの操作を行う. 同時にロボットはグローバル座標に対して手先の位置と姿勢を保つようにアームの各関節の指令値を自動的に生成する. 以下にその方法を Fig. 7.14 を用いて説明する.

今, 座標 H から座標 H' へクローラが移動したとし, $T_0^H, T_0^{H'}$ をグローバル座標 O からロボットのベース部に固定された座標 H, H' への同次変換行列, $T_H^G, T_{H'}^G$ を H, H' から手先に固定された座標 G への同次変換行列と定義する. この時, グローバル座標 O から見て手先の位置と姿勢が変化し

ないとすると以下の等式が成り立つ.

$$T_0^{H'} T_{H'}^G = T_0^H T_H^G \quad (7.21)$$

上の式より, 移動後のロボットのベース部に固定された座標 H' から手先座標 G への同次変換行列 $T_{H'}^G$ が得られるので, 逆運動学を解くことでアームの各関節の指令値を求めることができる. なおクローラの移動量はデッドレコニングにより求めている.

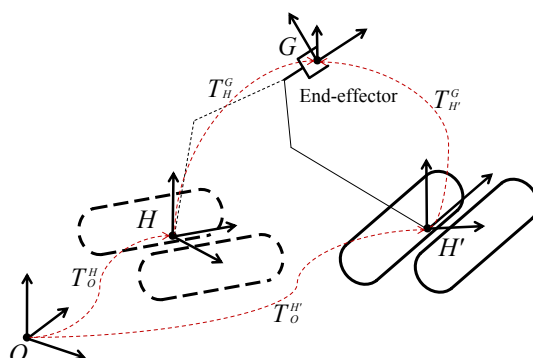


Fig. 7.14: Moving with keeping absolute position and posture of end-effector

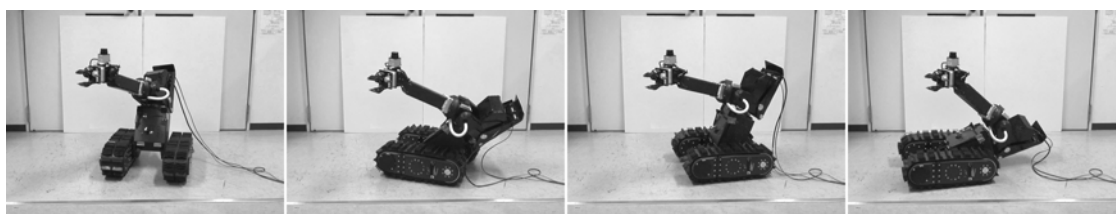


Fig. 7.15: Moving with keeping absolute position and posture of end-effector

7.4.2 手先の Structured LED

7.3.2 節の手法で対象物に接近できるが, LRF の精度にも限界があり, 手先と目標位置とは通常誤差が残る. 操縦者が, この誤差を減らしていく動作をする際に補助を行うのが, 以下に提案する手法である. Fig. 7.16 のようにグリッパの指先に LED で構成したビーム投影装置を取り付けておき, そのビームの対象物への投射状況をモニターカメラで確認出来るようにすることで, どちらの指にどの程度物体が近接しているかを操縦者に分かりやすく指示するシステムである. グリッパに取り

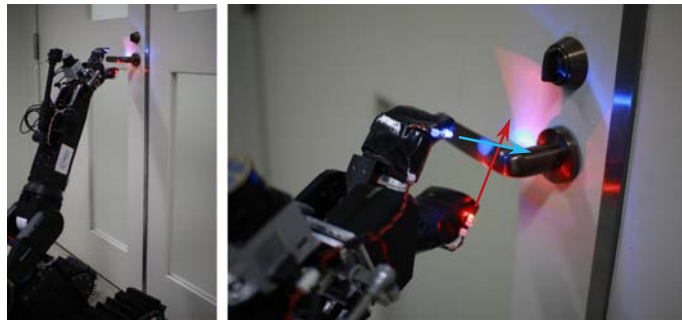


Fig. 7.16: Showing perspective by LED



Fig. 7.17: Gripper camera view without LED(left), with LED(right)

付けられたカメラの画像を Fig. 7.17 に示す。このような光の反射は物体把持動作を改善出来ることが確認出来ている。現在は 15° の指向角を持った LED をそのまま用いているが、指向角を小さくすることや、スリット光にするなど、光の形状を検討中である。

7.5 まとめ

本章では、高い遠隔操作性を実現する Shared Autonomy の立場の制御系の構成するため、3D 距離データを操縦者に提示し視覚を補助するためレーザレンジファインダ (LRF) を導入し、さらに画面上で 3D マップの望みの位置を数点クリックしてそれらの座標を指定できるようにし、その情報を利用してロボットに与えるべき動作を生成する手法を導入した。作業頻度の高いと思われる「対象物への接近」、「回転操作」、「手先の姿勢の保持」の作業に対してこの手法を適用した。

第8章 HELIOS IXの性能評価と動作試験

先に述べた仕様を満足しているか確認するためいくつかのテストを行った。Table 8.1 に基本的な性能試験の結果を示す。最後に押す場合と引く場合のドアを通り抜ける実験について述べる。

8.1 移動性能

8.1.1 斜面上の走行

ロボットの転倒判定を行うため、広瀬らが提案した正規化エネルギー安定余裕 (NE 安定余裕) [65] を実測した重心の位置から調べた。これは移動機械の重心が転倒中に描く軌道の最高点と初期位置との鉛直方向距離の差で安定性を表すもので、次式で表される。

$$S_{NE} = h_{max} - h_0 \quad (8.1)$$

まず *pitch* 方向 (Fig. 8.2(左)) について述べる。ロボットの斜面に対する傾き ψ が 0 のときの点 A の位置を基準として重心の高さ h は以下であらわされる。

$$h = L \sin(\theta_{pitch} + \psi + \phi) + r - r\psi \sin \theta_{pitch} \quad (8.2)$$

Table 8.1: Basic performance of HELIOS IX

| Item | Result |
|----------------------|---------------|
| Slope | 45° |
| Slope (crossing) | 40° |
| Speed on flat ground | over 7 km/h |
| Gripper Payload | 8 kg |
| Battery duration | about 90 min. |

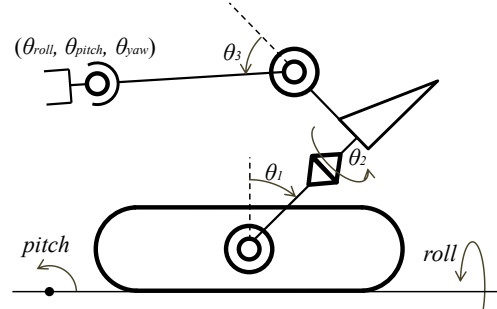


Fig. 8.1: Definition of joint angle

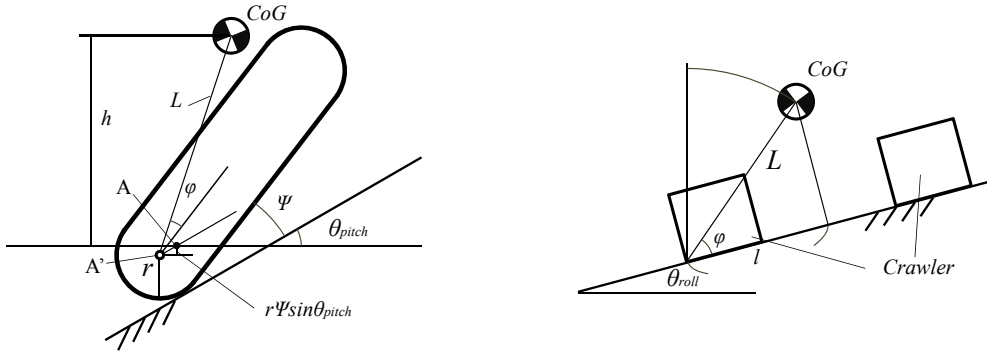


Fig. 8.2: Geometry of pitch (left) and roll (right) angle

これを ψ で微分して,

$$\frac{dh}{d\psi} = L \cos(\theta_{pitch} + \psi + \phi) - r \sin \theta_{pitch} \quad (8.3)$$

$$\arg \max_{\psi} h = \arccos \frac{r \sin \theta_{pitch}}{L} - \theta_{pitch} - \phi \quad (8.4)$$

$$(8.5)$$

これを式 8.2 に代入すると h_{max} が求まる. また初期高さ h_0 は

$$h_0 = L \sin \theta_{pitch} + \phi \quad (8.6)$$

となり S_{NE} が求まる. ロール方向 (Fig. 8.2(右)) も同様にして最高到達高さと初期高さはそれぞれ,

$$h_{max} = L \quad (8.7)$$

$$h_0 = L \sin \theta_{roll} + \phi \quad (8.8)$$

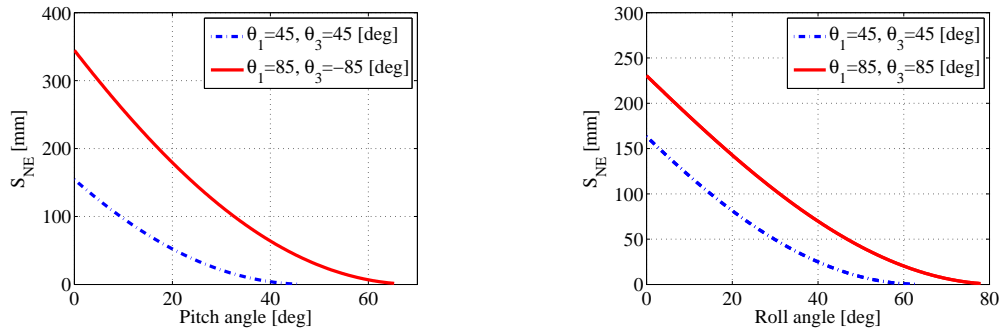


Fig. 8.3: NE stability margin of pitch (left) and roll (right) angle

と求めることができる。

Fig. 8.3 にロボットの *pitch* 軸周りと, *roll* 軸周りの NE 安定余裕を示す. アームの各関節角度は Fig. 8.1 のように定義し, *pitch* 軸周りでは, 通常の走行姿勢 ($\theta_1 = 45^\circ$, $\theta_3 = 45^\circ$) と比べ, アームを上方に倒した姿勢 ($\theta_1 = 85^\circ$, $\theta_3 = -85^\circ$) の方が NE 安定余裕が大きくなっている. *roll* 軸周りは, アームを内側に倒し ($\theta_1 = 85^\circ$, $\theta_3 = 85^\circ$), 同様の結果が得られる. なお, このとき $\theta_2 = \theta_{roll} = \theta_{pitch} = \theta_{yaw} = 0$ としている. アームの姿勢によって重心を制御することで, 転倒しにくくできることが示された.

Fig. 8.4 に米テキサスの実験施設 Disaster City において 45° の斜面の昇降と 40° の斜面を横切っている様子を示す. これ以上の傾斜ではクローラがスリップし走行することはできなかった.

このように重心を斜面の上方に片寄らせて走行するため, 地形が上りから下り, または下りから上りに切り替わる場所では, その場旋回やアームの第 2 関節を 180° 回転させ進行方向を切り替えることで対応できると考えられる.

8.1.2 階段昇降

まず, 踏破可能な階段の高さ (蹴上げ) を検討する. Fig. 8.5(a) に示すように, θ_p はクローラの傾き, θ_s は越えるようとしている段の端部と重心を結ぶ線の傾き, θ_g は踏面上の接地点と重心を結ぶ線の傾きとする. また, ロボットはアームを上方に倒した姿勢 ($\theta_1 = 90^\circ$, $\theta_3 = -85^\circ$) をとっているとする. この蹴上げ a をもつ階段を越える条件は, クローラで前進したときに $\theta_g = 0$ ($\theta_p = 85^\circ$) となる前に $\theta_s < 0$ となることである. θ_s は Fig. 8.5(左) から,

$$\theta_s = \text{atan2}(l, L \sin(\theta_p + \phi) - (a - r)) \quad (8.9)$$

$$(8.10)$$

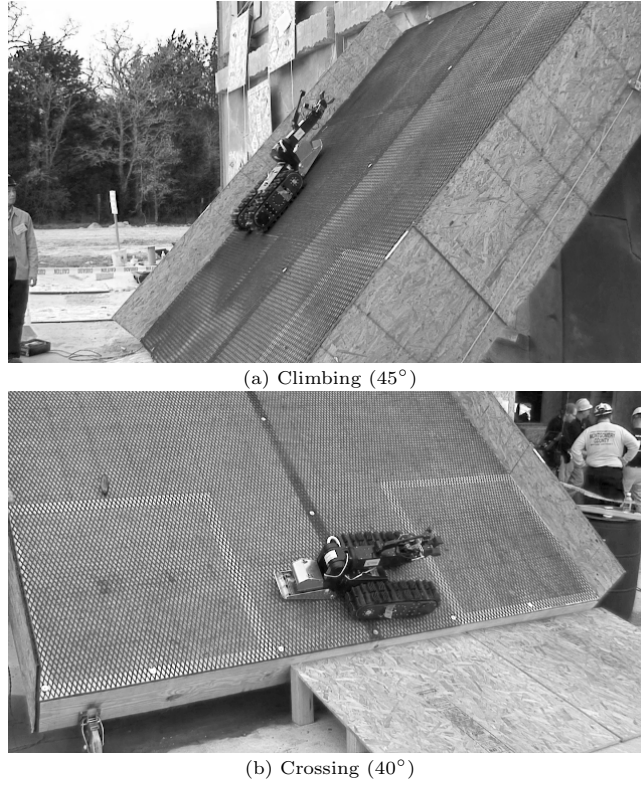


Fig. 8.4: locomotion on a slope (experiment at Disaster City, rescue training facility in Texas)

ここで

$$b = d - L \cos(\theta_p + \phi) \quad (8.11)$$

$$d = \frac{(a - r) \cos \theta_p + r}{\sin \theta_p} \quad (8.12)$$

$$L = \sqrt{(x_g + l)^2 + z_g^2} \quad (8.13)$$

$$\phi = \text{atan2}(z_g, x_g + l) \quad (8.14)$$

また, θ_g は

$$\theta_p = \frac{\pi}{2} - \phi \quad (8.15)$$

のときに 0 となる.

Fig. 8.5(b) に θ_p と θ_s の関係を, 数種類の階段の蹴上げ a についてプロットする. $a = 170 \text{ mm}$ のときには $\theta_p > 30^\circ$ で $\theta_s < 0$ となり, 30° の階段であればロボットは *pitch* 方向に揺動することなく

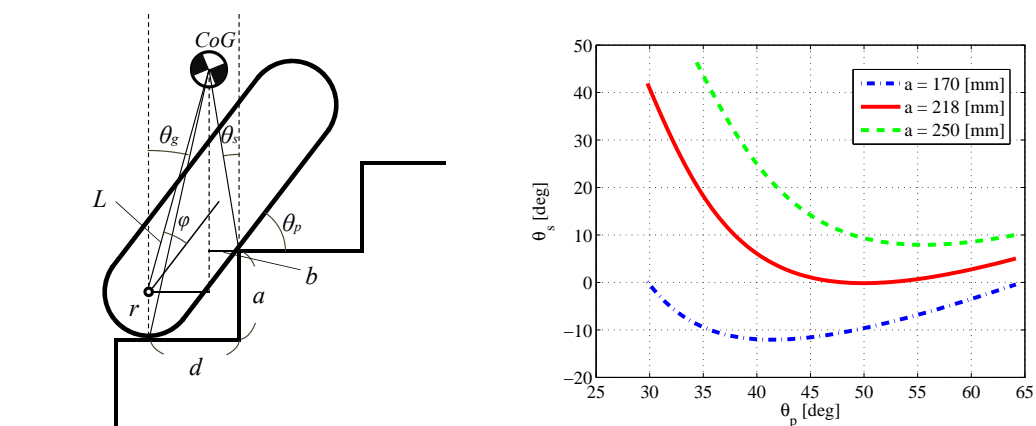


Fig. 8.5: Condition of stairs climbing



Fig. 8.6: Stairs climbing with sled

階段を登ることが示されている。また、 $a > 218 \text{ mm}$ で θ_s は常に正となり、階段を越えることができなくなることが分かる。

Fig. 8.6 に蹴上げ 170 mm, 角度 30° の階段を昇る様子を示す。階段の最初の段にそりを押しつけて左右のクローラを持ち上げて一段目を乗り越える (Fig. 8.6(1)(2))。その後はそりをクローラと平行にし階段の端部に滑らせて階段を昇っていく。このとき、そりの端からクローラの端までは 930 mm となり、多くの階段で常に 2 点以上の階段の端部に接するため、安定して昇ることができる。下方への転倒を防ぐためアームは階段上方へ倒し、重心を支持点内に保つようになっている (Fig. 8.6(3)(4))。

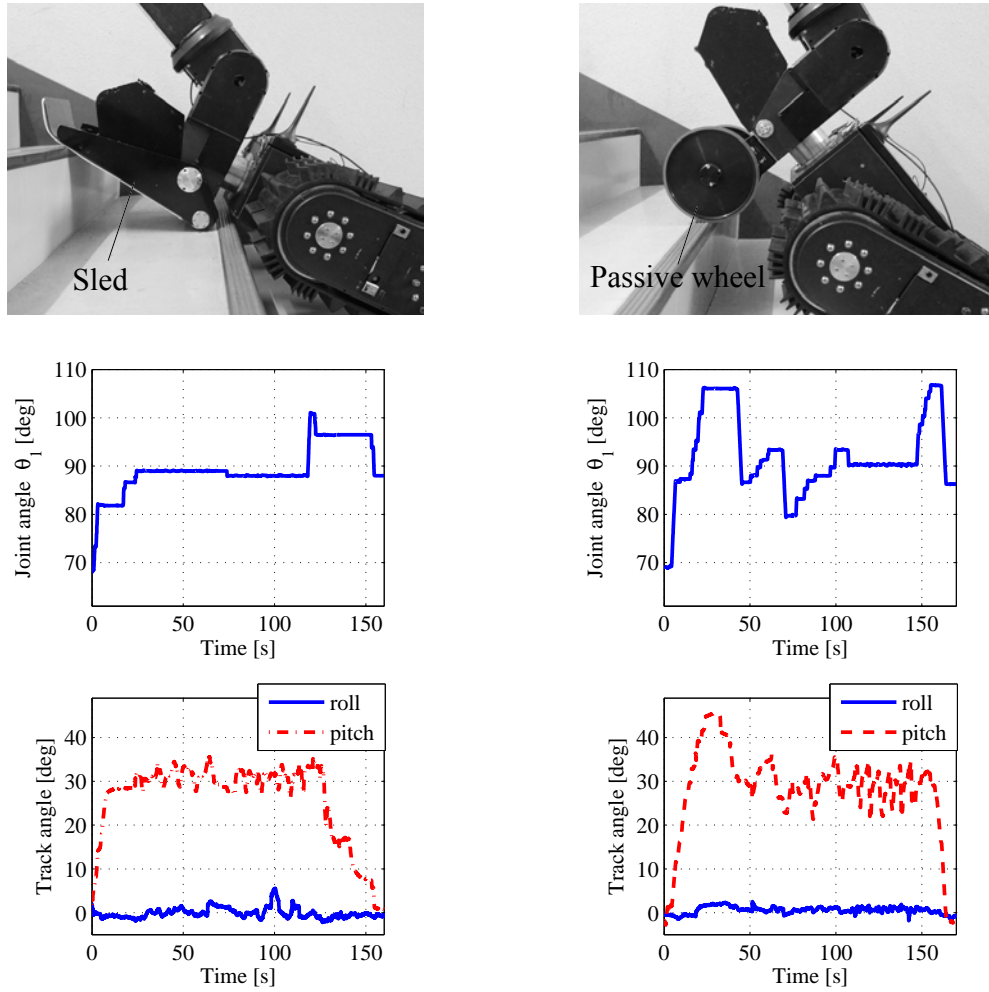


Fig. 8.7: Attitude of track and angle of θ_1 (Fig. 8.1) while climbing stairs. left: sled. right: passive wheel.

Fig. 8.7 に十数段の階段を昇った時のアームの角度 θ_1 (Fig. 8.1) とクローラの姿勢 ($pitch, roll$) を、そりを用いた場合を左に、そりの代わりに受動輪を用いた場合を右に示す。受動輪を用いた場合、クローラの駆動だけでなく階段の形状に合わせてアームを操縦する必要があったが、その場合には階段の昇り始めと昇り終わりを除いてアームを操縦する必要はなく、クローラの $pitch$ 角の揺動も受動輪と比べて小さいことがわかる。なお、そりを使用しているときに $roll$ 角の変動が大きいのは、受動輪よりもそりの方が横滑りしやすいためと考えられる。

8.1.3 不整地走行実験

木製のブロックを用いた段差乗り越え実験を行った。このとき操縦者は直接ロボットを見ながら走行速度指令のみをジョイスティックにより与えている。Fig. 8.8 にその走行中の様子を示す。5章で提案した対地適応制御を行わない場合と比較し、制御を実施することで安定した段差乗り越えが可能となることがわかる。また、走行実験時のモータの角度とモータに流れる電流値を Fig. 8.9 に示す。対地適応制御を行わない場合を Fig. 8.9 左に、制御を実施した場合を Fig. 8.9 右に示している。対地適応制御を行った方が電流のピークが下がり、同一距離の走行に要する時間が短縮するとすれば、走破性と省電力性の両方が向上すると考えられる。さらに、左右のトルクの差によってクローラを揺動させるが、アームの操作時には左右のトルクに差は生じにくいいため、トルク制御を行いながらアームの操作が可能である。

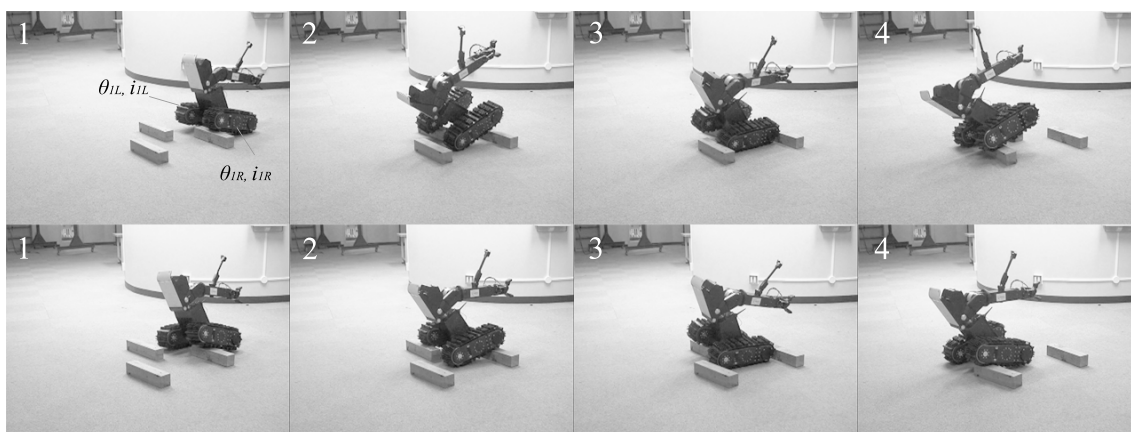


Fig. 8.8: Running test. upside: position control only. downside: position and torque control.

8.2 作業性能

8.2.1 重量物のハンドリング

Fig. 8.10 に約 7 kg の椅子を持ち上げている様子を示す。周囲の温度環境に依存するが、短時間であればそれ以上の負荷を持ち上げることも可能である。室内環境の比較的重い障害物を排除しながら情報収集する能力を持つことが示された。

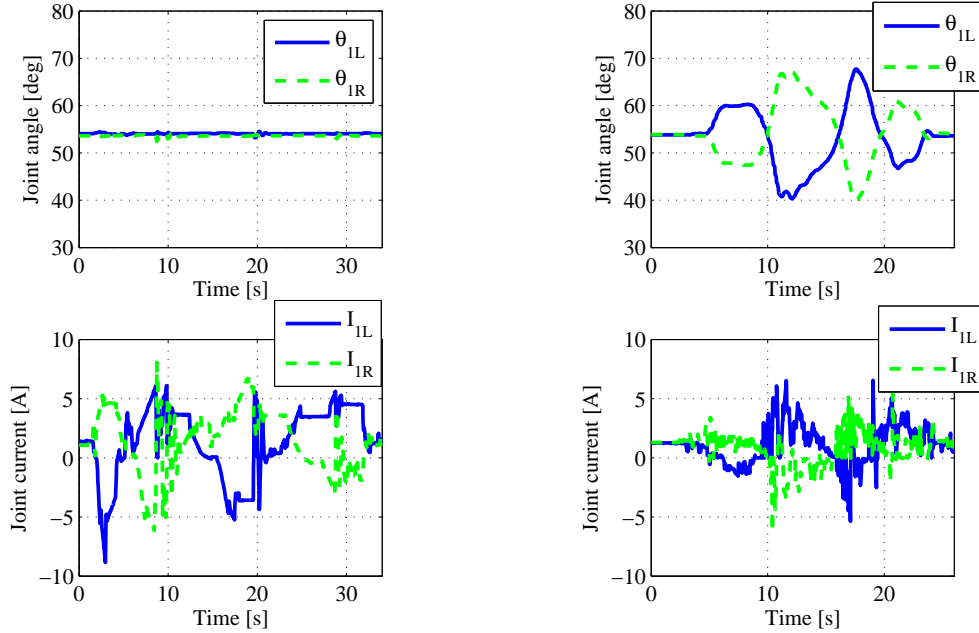


Fig. 8.9: Joint angle and current. left: position control only. right: position and torque control.

8.2.2 カメラ画像による操作

カメラアームの先端に取り付けられたカメラの画像により周囲の環境とロボット自身を確認することができる。Fig. 8.11(a) に建物内を走行中のカメラ画像を示す。数種類のカメラの位置をあらかじめ用意しておいて、操縦者は簡単に見たい位置、例えば前方、後方、ロボット自身などを切り替えられるようにした。Fig. 8.11(b) にエンドエフェクタに取り付けられたカメラ画像を示す。180°の画角を持つ魚眼カメラを採用し、周囲の環境に手先部も映り込むようにすることで手先部を操縦しやすいようになっている。Fig. 8.12 に暗い室内での実験の様子を示す。別室にいるオペレータが、Fig. 6.4 に示すように取り付けられた LED に照らされたカメラ画像を見ながら操縦している。最適な明度の画像を得るため、LED の照度を調節できるようにした。例えば、物体を把持する操作を行う場合、対象物に近づくとつれ LED の照度を低くする必要があり、一方で移動するときには周囲を照らすため照度を高くする必要があった。



Fig. 8.10: Lifting a 7 kg chair



(a) Camera arm



(b) Gripper

Fig. 8.11: CCD camera view

8.2.3 3D 情報を用いた操作系

回転操作

7.3.3 節で導入した回転手法の操作性を客観的に評価するため、3人の被験者に直接ロボットを観察させずに HELIOS IX に円柱型のドアノブを把持させて回転させるまでの動作を、(1) 回転軸指定するか否か、(2) 力制御を使うか否か、の組み合わせそれぞれについて動作実験を行い、それぞれの実験に要した時間を計測した。結果を Table 8.2 に示す。回転軸指定、力制御ともに使用しなかった場合は4回の試行中、2回は過電流により中断した。回転軸指定、力制御どちらかを使用した場合は中断することなくドアノブを回転することが可能であり、両方の手法を使った場合が最短となったことから、提案手法の有効性が検証できたと考えている。しかしながら、両手法を用いた場合でも平均で動作完了までに1分以上要している。これはドアノブを握るまでに多くの時間を消費している

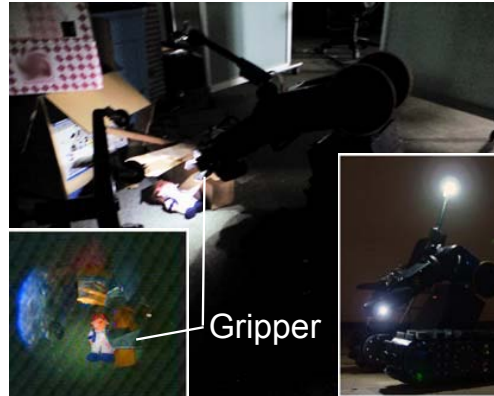


Fig. 8.12: Dark room test

ためであり, 対象物まで接近し把持する動作のさらなる改善が今後の課題となっている.

Table 8.2: Average time required

| | with force feedback | without force feedback |
|-----------------------|---------------------|------------------------|
| with rotation axis | 77.6 s | 101.2 s |
| without rotation axis | 87.6 s | 112.5 s |

手先姿勢の保持

7.3.4 節で導入した手先の姿勢を保つ手法を用いて, 手先を水平に保ちながら容器を移動させている様子を Fig. 8.13 示す. この時, 操縦者は予め地面を 3 点クリックして地面に垂直なベクトル (z 方向) を定義しておき, x, y 軸周りの回転を拘束している. なお, 手首の可動範囲が広いために様々な手先位置で手先姿勢を保つことが可能となっている.

8.3 ドアの通り抜け実験

総合的な操作実験として, ドアを通り抜ける操作実験を行う. ここでは, 6 軸力センサを用いたときについて報告し, 式 7.16-7.17 のアドミッタンス行列の成分は $k_f = 2 \text{ (mm/s)/N}$, 回転操作中の位



Fig. 8.13: Carrying bottle while keeping posture of end-effector

置制御と力制御を切り替える閾値は $d_{th} = 50 \text{ mm}$ としている。なお、操縦者はロボットを直接見ながら操縦している。

8.3.1 ドアを引いて通り抜ける

ドアの正面に立ってドアを引くとロボット自身の体に衝突するため、ドアを引いて通り抜ける動作は、特にドアクローザで自動で閉まるドアのときには、押す場合よりも難しい。文献 [14] のロボットでは、アームを使ってドアをわずかに開けた後、前方についた吸盤で扉を吸着し押ししたり引いたりできるように工夫している。しかし、吸盤を装備する必要がある、ドアを引く場合には通過が難しい。本研究では Fig. 8.14 のように左右のクローラの間でドアを挟み、手をノブから離してもドアが閉まらないようにする動作を導入する。この方式を用いてドアノブを回転させてドアを引いて開け、通過する実験を行った。なお、このドアのドアノブはレバー型であり、ドアを引くためには約 35 N を要する。手順を以下に示す。また、そのときの様子を 3 次元距離データの取得開始時刻を基準とした経過時間とともに Fig. 8.15 に示す。Fig. 8.15 の左側は操縦者が見ている操作画面である。

0. 手動操作でドアの前へ移動する。
1. 3次元距離データを取得する。操縦者は GUI 上のボタンを押し、この操作モードへ切り替えるとロボットは LRF を取り付けられた手首を回転させ周囲の 3次元距離データを取得する。
2. 手動操作によりドアノブの把持する。4.3 節で述べたダンピング制御を実施し、内部力(トルク)を打消しながらドアノブを把持する。
3. ドアノブの回転軸の指定と回転操作。操縦者は GUI 上のドアの平面 3 点と、ドアノブの回転軸の位置 1 点をクリックし、回転軸を指定する。そしてジョイスティックを左右に動かすことにより、手先を回転させる。
4. ドアの回転軸の指定と回転操作。操縦者は GUI 上のドアのヒンジ部を 2 点クリックし、回転軸を指定する。実際にはこのドアのヒンジ部は金属光沢があり、この部分の距離データが欠落し

ている。そのため付近の 2 点をクリックしておき、コントローラの十字キーを用いて回転軸の位置の微調整を行った。また、ドアの回転軌道方向へは硬く、それ以外の方向には柔らかくなるようにアドミッタンス行列が設定されるため、Fig. 8.15 左 (4) の力ベクトルを表した赤い球は、ドアの回転軌道方向へ伸びており、余計な力が作用していないことが分かる。

5. ドアを左右のクローラの中に挟む。7.4.1 節で述べた手先の絶対位置と姿勢を保ちながら移動する操作モードに切り替え、グリッパでドアノブの位置を保持したまま、右側のクローラをドアの内側へ差し込む。
6. 手動操作でドアノブからグリッパを離す。
7. 手動操作により移動しながらクローラでドアを押し、最後は後ろ向きにドアを通過する。

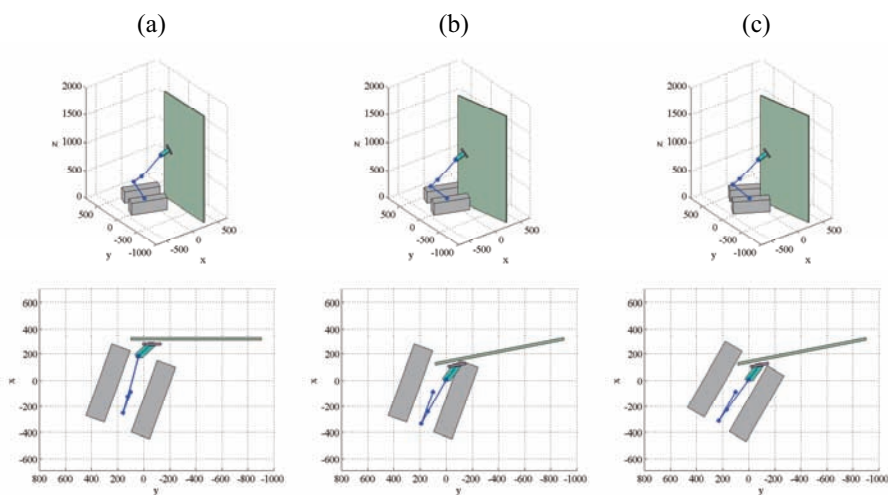


Fig. 8.14: Pull-type door opening flow

8.3.2 ドアを押しして通り抜ける

ドアを押し開け、通過する実験を行った。なお、このドアのドアノブは円筒型であり、ドアを押すためには約 40 N を要する。その手順を以下に示す。なお、手順 0-2 までは前節のドアを引く場合と同じである。また、そのときの様子を 3 次元距離データの取得開始時刻を基準とした経過時間とともに Fig. 8.16 に示す。Fig. 8.16 の左側は操縦者が見ている操作画面である。

3. ドアノブの回転軸の指定と回転操作。操縦者は GUI 上のドアの平面 3 点をクリックし、回転軸を指定する。この時回転軸の位置はグリッパの中心位置となる。そしてジョイスティックを左右に動かすことにより、手先を回転させる。

4. ドアの回転軸の指定と回転操作. 引いて開ける場合と同様にして, 操縦者は GUI 上のドアのヒンジ部を 2 点クリックし, 回転軸を指定する. そしてジョイスティックを左右に動かすことにより, ドアをわずかに開ける.
5. 7.4.1 節で述べた手先の絶対位置と姿勢を保ちながら移動する操作モードに切り替え, グリッパでドアノブの位置を保持したまま前進し, ノブからグリッパを離してもクローラでドアが閉まらない位置まで移動しておく.
6. 手動操作でドアノブからグリッパを離し, 移動しながらクローラでドアを押しそのまま通り抜ける.

なお, これらの実験では 6 軸力センサを用いているが, 3 軸力センサを用いた場合もドアの通り抜けは可能であった. しかし, 3 軸力センサを用いた場合, 手先の姿勢については制御できないため, グリッパに内部モーメントまたはすべりが発生する可能性があり, 6 軸力センサを用いた時と比較し, 慎重な操作を要する. 手先を小型軽量に構成できることとのトレードオフの関係にある.

8.4 まとめ

移動性能については, まず, アームの姿勢によって重心を制御することで比較的急な斜面や階段を走行可能なことを重心位置の計算と, 実験によって確かめた. 階段昇降ではアームの一部のそりのような構造を用いて受動車輪と比較し安定して走行できることを示した. 5.2 節で導入したクローラの制御法により, これまでよりも安定した不整地走行が可能となった. 作業性能については, 7.3 節で導入した 3D 距離情報を用いた操作系により, 回転操作に要する時間を短縮できることを示した. 最後に押す場合と引く場合のドアを通り抜ける実験を行い, 回転軸を指定する手法などを活用し, それらが可能なことを示した. 従来難しかった引く場合については HELIOS IX の特性を活かして左右のクローラの間でドアを挟む動作を挿入することで可能とすることも示した.

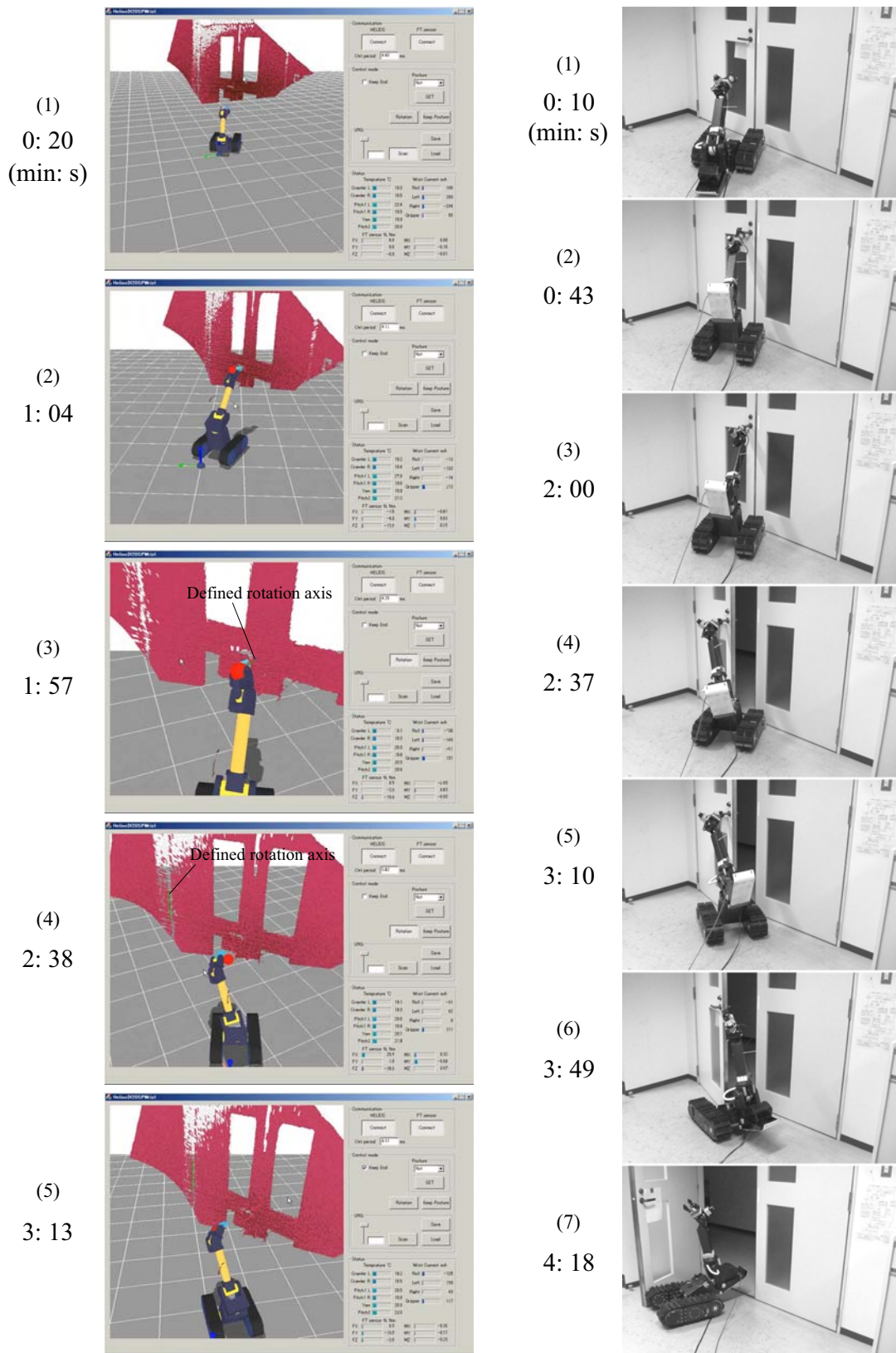


Fig. 8.15: Pull-type door opening experiment

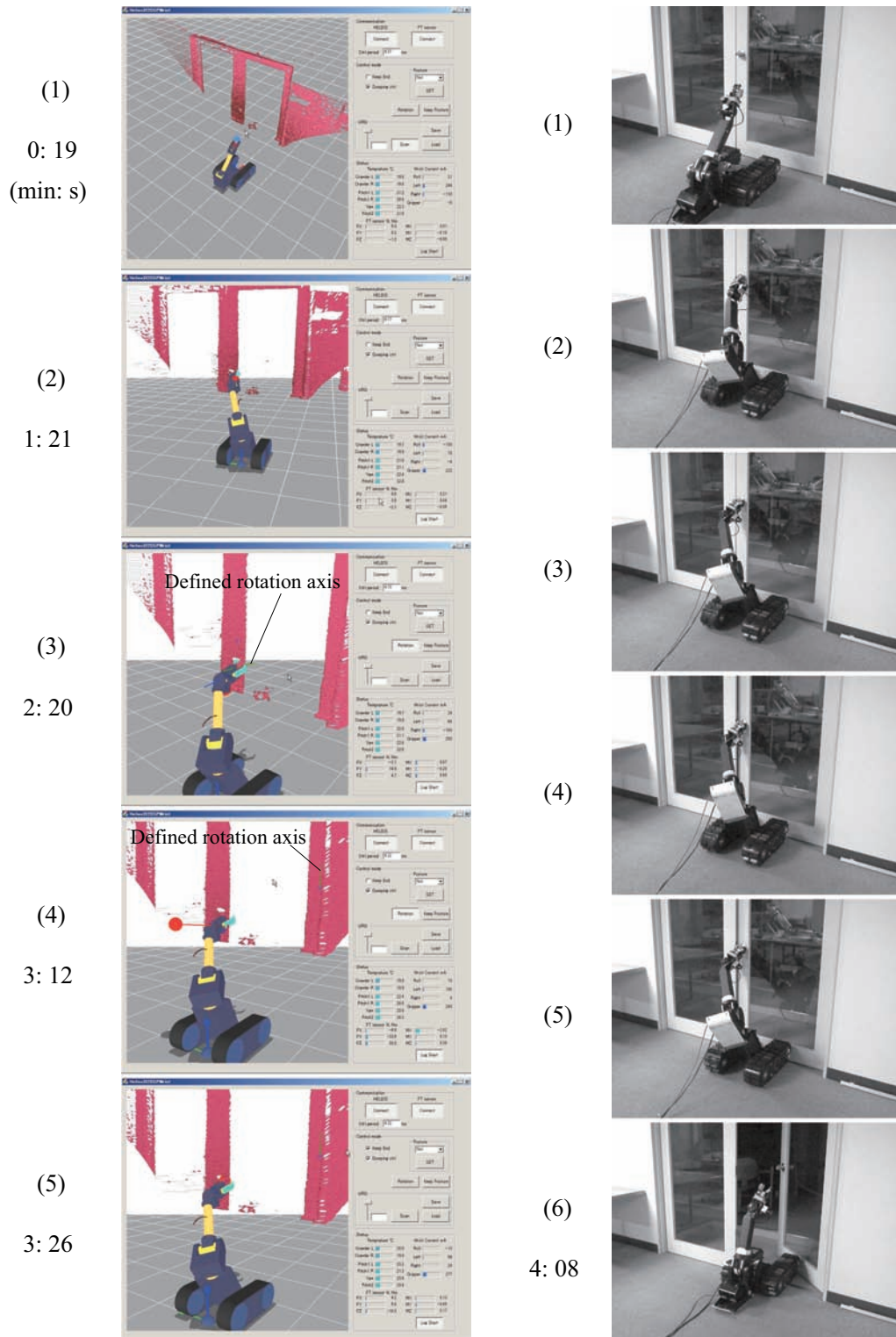


Fig. 8.16: Push-type door opening experiment

第9章 結論と今後の課題

9.1 結論

本論文は、被災した建物内などにおいて遠隔操作により、移動し作業を行うことのできるクローラ型移動作業ロボット HELIOS IX を実現することを目的として、その構成法を検討した。本研究では、特に HELIOS IX の手首機構と、移動・作業時の遠隔操作性を向上させることを目標とした。

第3章では、広い可動範囲、大きな耐荷重、防塵防水性を有する、手首機構の設計法を論じた。球面リンク機構を用いた2自由度手首機構を提案し、まず、その機構の基本的な運動学解析を行い、それを基に可動範囲最大化手法を導入した。次に高い出力モーメントを実現する受動対偶の構成の検討し、本研究の場合には剛性が高くコンパクトに設計可能な球対偶を採用することを述べた。

第4章では、HELIOS IX のアーム先端にかかる力計測のための、手首に装着すべき多軸力センサの構成とそれを用いた力制御法を論じた。手首に多軸力センサを取り付ける場合、多軸力センサは力が働く手先部からかなり離れた位置に取り付ける場合がほとんどである。この力作用点のずれによるモーメント計測範囲の制限を補正するため、多軸力センサ外部にセンサと並行して付加的な起歪体を取り付ける構成法を提案した。そして、実際に起歪体を取り付けた3軸力センサを試作し、それを HELIOS IX に装備して動作実験を行い、提案する多軸力センサ構成法とその力制御法の有効性を検証した。

第5章では、HELIOS IX の移動性能を向上させるための検討を行った。まず、中央のアーム機構のフリック部にそりのような機構を導入した。ついで、HELIOS IX の形態を活用した対地適応動作を生成するため、左右のクローラが受けるトルクの差を制御する手法を提案した。

第6章では、3-5章までの検討を踏まえた、HELIOS IX 全体のハードウェア構成について述べた。特に手首機構は3章で提案した可動範囲最大化手法により、従来よりも大きな可動範囲を実現した。防塵・防水性、配線を全て機構内に収めていることなどの実用的な機能を持たせた試作機を製作し、リンクパラメータのキャリブレーションも行った。

第7章では、高い遠隔操作性を実現する Shared Autonomy の立場の制御系の構成するため、3D 距離データを操縦者に提示し視覚を補助するためレーザレンジファインダ (LRF) を導入し、さらに画面上で3D マップの望みの位置を数点クリックしてそれらの座標を指定できるようにし、その情報を活用してロボットに与えるべき動作を生成する手法を導入した。作業頻度の高いと思われる「対象物への接近」、「回転操作」、「手先の姿勢の保持」の作業に対してこの手法を適用した。

第8章では、各章で提案・導入してきた手法の有効性を確かめるために行った実験について述べた。移動性能については、まず、アームの姿勢によって重心を制御することで比較的急な斜面や階段を走行可能なことを重心位置の計算と、実験によって確かめた。階段昇降ではアームの一部のそりのような構造を用いて受動車輪と比較し安定して走行できることを示した。5章で導入したクローラの制御法により、これまでよりも安定した不整地走行が可能となった。作業性能については、7章で導入した3D距離情報を用いた操作系により、回転操作に要する時間を短縮できることを示した。最後に押す場合と引く場合のドアを通り抜ける実験を行い、回転軸を指定する手法などを活用し、それらが可能なことを示した。従来難しかった引く場合については HELIOS IX の特性を活かして左右のクローラの間でドアを挟む動作を挿入することで可能とすることも示した。

9.2 今後の課題

ドアの通り抜ける操作などでは、未だ多くの時間を要している。作業時間を短縮させ、実用性の高いシステムに仕上げていくためには以下の項目を検討して行く必要があると考えている。

9.2.1 情報の提示

HELIOS IX は、クローラとアームのみで構成されているためアームの操作時にカメラをどこに配置しても、視点が変わってしまう問題点がある。また、1自由度のカメラアームではオクルージョンの問題もある。これら問題を解決するために、カメラアームを多自由度化し視点の安定化や様々な角度から対象物を観察できるようにすることを検討中である [66]。

現在操縦者は、ロボットに搭載されたカメラ画像とレーザーレンジファインダによる3D距離情報を利用しているが、その他の情報を利用することも考えられる。例えば、ロボットが環境と接触したときの音やモータの駆動音は操縦の助けになると思われる。

9.2.2 ユーザインターフェース

現在、HELIOS IX は基本的には手動操縦されるが、そのユーザインターフェースの評価は十分に行われていない。今回制作したゲームコントローラによる操縦系のほかに、小型で椅子と一体になったバイラテラル型のマスタースレーブシステム [67] を開発中である。それと同時に、頻繁に行われる作業についてはシーケンスを組むなどの自律機能を付加することも考えられ、総合的なユーザインターフェースの評価が必要である。

付録 A アームの運動学

A.1 一次試作手首機構を装備したアームの逆運動学

手首の 3 自由度 (roll, pitch, yaw) の回転軸が一点で交わるため逆運動学解を解析的に求めることができる [68].

手先の位置 (x_e, y_e, z_e) と姿勢を表す回転行列 $R_{gripper}$ を入力として, 6 つの関節角度 $\theta_{roll}, \theta_{pitch}, \theta_{yaw}$ (Fig. A.2), θ_1 (Shoulder), α_1 (ArmBase), θ_2 (Elbow) を求める逆運動学の解を示す.

まず手先の位置, 姿勢が与えられた時の手首の位置を求める. 手首のユニバーサルジョイントの中心と手先までの距離を L_4 として,

$$\begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{pmatrix} - R_{gripper} \begin{pmatrix} L_4 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{A.1})$$

手首の位置が求まる.

次に手首の位置 (x_w, y_w, z_w) を入力として, 3 つの関節角度 θ_1 (Shoulder), α_1 (ArmBase), θ_2 (Elbow) を求める逆運動学の解を示す. Shoulder の回転軸上に Fig. A.1 のように基準座標をとる.

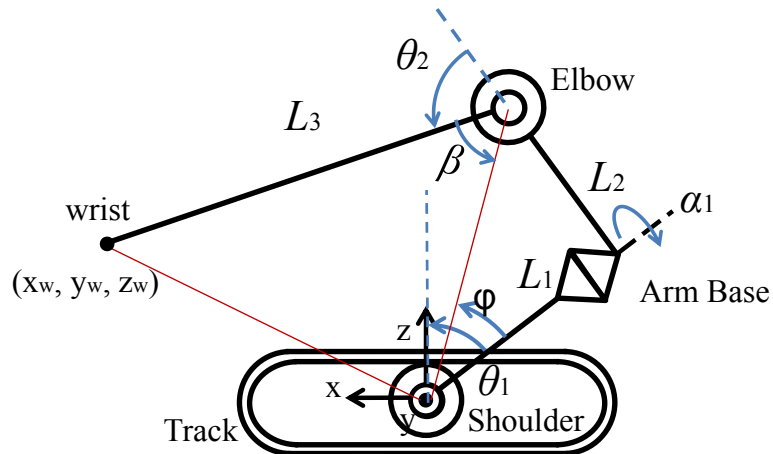


Fig. A.1: arm Geometry

三角形 Shoulder, Elbow, Wrist において余弦定理を用いて,

$$2\sqrt{L_1^2 + L_2^2}L_3 \cos \beta = L_1^2 + L_2^2 + L_3^2 - (x_w^2 + y_w^2 + z_w^2) \quad (\text{A.2})$$

となる. θ_2 は,

$$\theta_2 = \frac{\pi}{2} + \phi - \beta \quad (\text{A.3})$$

であるから, 式 A.2 を β について解いて, 式 A.3 に代入すれば θ_2 が求まる. 手首位置の y 座標は,

$$y_w = (L_2 + L_3 \cos \theta_2) \sin \alpha_1 \quad (\text{A.4})$$

と表わされるので, $\sin \alpha_1$ について解けば, α_1 が求まる.

$$\sin \alpha_1 = \frac{y_w}{L_2 + L_3 \cos \theta_2} \quad (\text{A.5})$$

手首位置の x, z 座標は,

$$x_w = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \cos \theta_1 \cos \alpha_1 + L_3 (\cos \theta_1 \cos \alpha_1 \cos \theta_2 - \sin \theta_1 \sin \theta_2) \quad (\text{A.6})$$

$$z_w = L_1 \cos \theta_1 - L_2 \sin \theta_1 \cos \alpha_1 - L_3 (\sin \theta_1 \cos \alpha_1 \cos \theta_2 + \cos \theta_1 \sin \theta_2) \quad (\text{A.7})$$

と表わされ,

$$a = L_3 \sin \theta_2 - L_1 \quad (\text{A.8})$$

$$b = (L_2 + L_3 \cos \theta_2) \cos \alpha_1 \quad (\text{A.9})$$

とにおいて, $\sin \theta_1, \cos \theta_1$ について解けば,

$$\cos \theta_1 = \frac{bz_w + ax_w}{a^2 + b^2} \quad (\text{A.10})$$

$$\sin \theta_1 = \frac{bx_w - az_w}{a^2 + b^2} \quad (\text{A.11})$$

$$\theta_1 = \text{atan2}(\sin \theta_1, \cos \theta_1) \quad (\text{A.12})$$

θ_1 が求まる.

そして, 手首の関節 $\theta_{roll}, \theta_{pitch}, \theta_{yaw}$ を求める. 上で得られた $\theta_1, \alpha_1, \theta_2$ を用いて手首の手前までの回転行列 R_{04} を求め,

$$R_{wrist} = R_{04}^T R_{gripper} \quad (\text{A.13})$$

とし, 回転行列 R_{wrist} を Roll, pitch, yaw に変換すれば $\theta_{roll}, \theta_{pitch}, \theta_{yaw}$ が得られる.

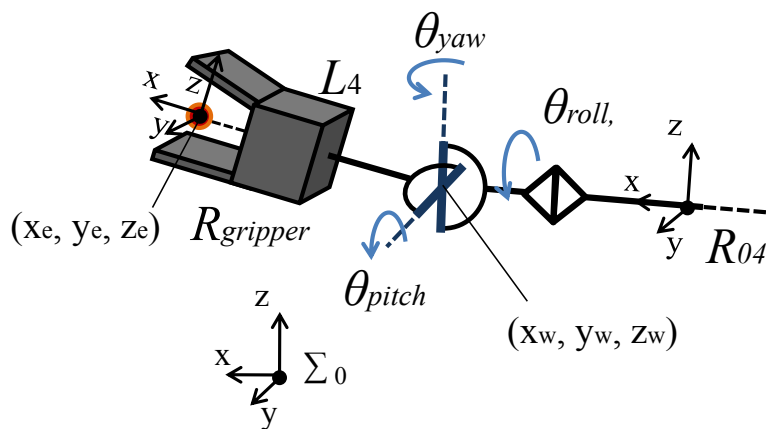


Fig. A.2: Joints of wrist

A.2 新しい手首機構を装備したアームの逆運動学

HELIOS IX の手首機構は, Fig. 6.3 に示すように手首の-pitch 方向の可動範囲を稼ぐために pitch, yaw 軸を roll 軸からオフセットさせている. そのため逆運動学は解析的に解くことはできないので, 文献 [69] の手法を用いてヤコビ行列から数値的に求めた.

付録B 手首機構を空間リンク機構としてとらえたときの運動学解析

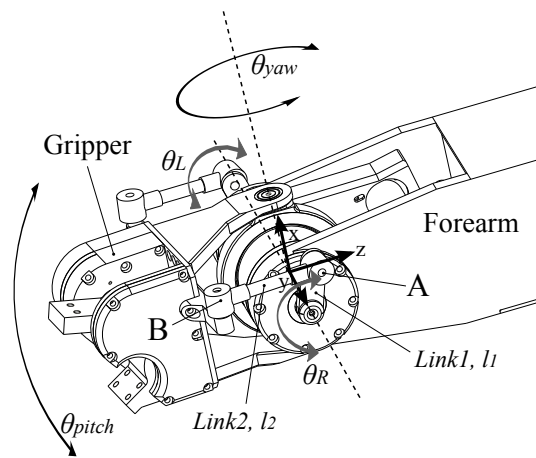


Fig. B.1: Kinematics of wrist mechanism

Fig. B.1 に示すように座標系を設定する. 手首関節のユニバーサルジョイントの回転軸の交点を原点を置き, z 軸を前腕 (Forearm) 方向に, y 軸をピッチ軸と同軸に, $Link1$ の初期姿勢と平行に x 軸を取る. この座標系は前腕 (Forearm) に固定され, グリッパが動くものとする. この手首機構は, 左右にリンク機構を持っているが, ここでは Fig. B.1 の手前側のリンクに着目する. $Link1$ の回転角度を θ_R , グリッパの姿勢を θ_{pitch} , θ_{yaw} と置く. $Link1$ の先端のボールジョイントの回転中心 (A) の位置ベクトルを l_A , グリッパ側に配置されたボールジョイントの回転中心 (B) の位置ベクトルを l_B と表す.

点 A の位置 l_A は, 点 A の初期位置 \hat{l}_A と y 軸周りに角度 θ_R の回転を表す回転行列 R_{y,θ_R} を用いて式 B.1 のように表すことができる. 同様に点 B の位置 l_B は式 B.2 となる.

$$l_A = R_{y,\theta_R} \hat{l}_A \quad (B.1)$$

$$l_B = R_{y,\theta_{pitch}} R_{x,\theta_{yaw}} \hat{l}_B \quad (B.2)$$

ここで *Link2* の長さ l_2 は一定であるという拘束条件から式 B.3 が成り立つ。

$$(\mathbf{l}_A - \mathbf{l}_B)^2 - l_2^2 = 0 \quad (\text{B.3})$$

これを θ_R について解くことで逆運動学を解析に求めることができる。具体的には、点 A の原点からの y 方向オフセット量を l_{offset} とし、点 A の初期位置を $\hat{\mathbf{l}}_A = (l_1, l_{offset}, 0)$ 、点 B の位置 $\mathbf{l}_B = (x_B, y_B, z_B)$ と改めて置き、式 B.3 を展開すると、

$$\begin{aligned} & (\mathbf{l}_A - \mathbf{l}_B)^2 - l_2^2 \\ &= l_1^2 - l_2^2 + (l_{offset} - y_B)^2 + x_B^2 + z_B^2 \\ & \quad + 2l_1(z_B \sin \theta_R - x_B \cos \theta_R) \end{aligned} \quad (\text{B.4})$$

ここで、

$$r = \sqrt{x_B^2 + z_B^2} \quad (\text{B.5})$$

$$\phi = \text{atan2}(x_B, z_B) \quad (\text{B.6})$$

$$d = l_2^2 - (l_{offset} - y_B)^2 - l_1^2 - x_B^2 - z_B^2 \quad (\text{B.7})$$

とすると、

$$\sin(\theta_R - \phi) = \frac{d}{2l_1 r} \quad (\text{B.8})$$

を得る。これより、

$$\theta_R = \text{atan2}\left(\frac{d}{2l_1 r}, \pm \sqrt{1 - \left(\frac{d}{2l_1 r}\right)^2}\right) + \phi \quad (\text{B.9})$$

として、逆運動学解を求めることができる。 θ_L についても同様にして解を得ることができる。

さらに式 B.6 は、点 B の初期位置を $\hat{\mathbf{l}}_B = (\hat{x}_B, \hat{y}_B, \hat{z}_B)$ とすると、

$$\phi = \text{atan2}(\hat{x}_B, \hat{y}_B \sin \theta_{yaw} + \hat{z}_B \sin \theta_{yaw}) + \theta_{pitch} \quad (\text{B.10})$$

となる。また、式 B.9 の第 1 項は θ_{yaw} のみの関数であることから、逆運動学解は θ_{yaw} の関数と θ_{pitch} の和となる。

付録C 自立移動ロボット Mole Iの開発

C.1 目的

実際に人が生活する街の中で自律的に活動するロボットの研究開発のため、2007年から2011年まで”つくばチャレンジ”[70]が開催された。課題は、つくば中央公園内の約1kmのコースをロボットが自律的に走行することである。つくばチャレンジを通じて自律ロボットの現状を知ることや開発の経験を積むことを目的として、つくばチャレンジ2010に参加した。開発したロボット (Fig. C.1, Table C.1) の概要と走行結果について報告する。

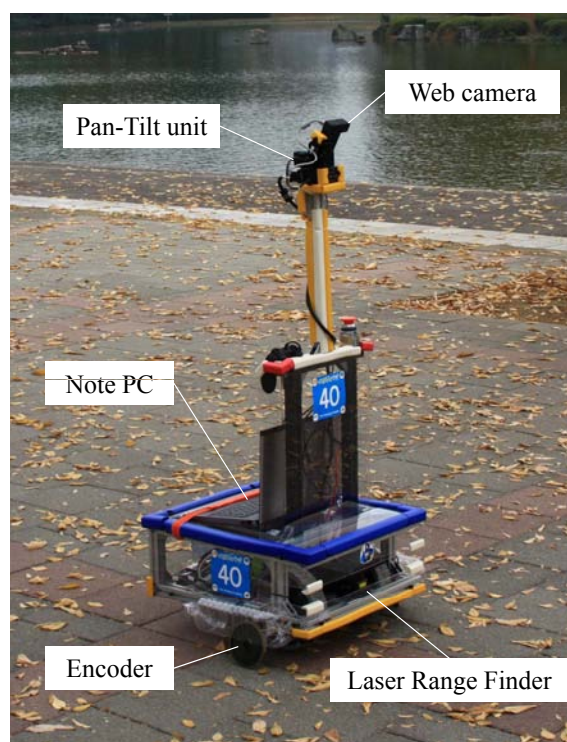


Fig. C.1: Mole I

Table C.1: Mole I Specifications

| | |
|----------------------|-----------------|
| Size(L×W×H) | 560×510×1300 mm |
| Weight | 30 kg |
| Speed on flat ground | 1.0 m/s |

C.2 ハードウェアの構成

ソフトウェアの開発に時間をかけるため、移動ロボットのハードウェアはシンプルでメンテナンスしやすいものを目指した。以下特徴を列挙する。

1. ロボットの筐体はミスミのアルミフレームを箱型に組んだ簡単な構造で、メンテナンス性も良好。
2. 独立 2 輪駆動型とし、Golden motor 社製ホイールインモータ ($\phi 22$, 180 W, 124 \$) を使用。
3. デッドレコニング用の計測輪 ($\phi 11$, 幅 6 mm) は、バネ付き蝶番で地面に押しつけて滑りを軽減。
4. レーザレンジファインダ (Top-URG) は地面から 200 mm の位置に固定。
5. web カメラ (ELECOM UCAM-DLP130T) はサスティナブルロボティクス製の雲台により、パン・チルトさせることが可能。
6. 借り物の LRF や雲台を除けば、PC を含めて 15 万円程度と安価。

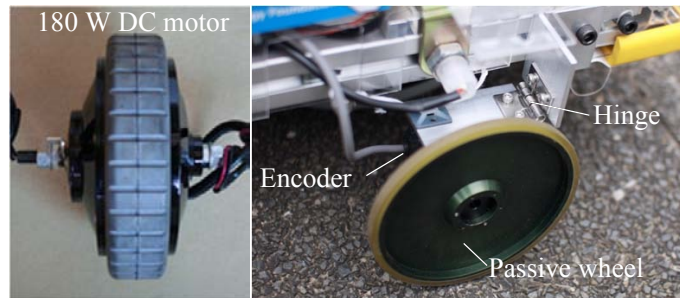


Fig. C.2: Wheel in motor (left) and passive wheel (right)

また、システム構成は Fig. C.3 のようになっている。PC は予め設定した道順情報とセンサ情報より左右の車輪の速度指令を生成する。マイクロコントローラの SH2 は PC から左右の指令速度を受け取り速度制御を行っている。また、デッドレコニングにより計測した位置情報 (x, y, θ) 等を PC に送信している。

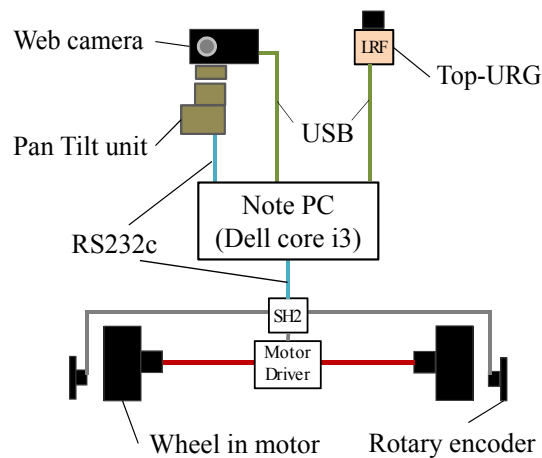


Fig. C.3: System of Mole I

C.3 ナビゲーション方法

Fig. C.8(a) のように、コースの曲がり角にウェイポイントを配置し、ウェイポイント間の距離及び次のウェイポイントの方向の表を予めテキストファイルで作成し、それをプログラムに読み込ませる。ロボットはエンコーダにより計測した走行距離が一定以上になればウェイポイントに到達したとみなし、その場旋回して次のウェイポイントに直進するという動作を繰り返す。

C.3.1 障害物回避

LRF により進行方向近くに障害物を検出した場合は、その障害物を避けて進行可能な方角を LRF の測定結果から探し、障害物までの距離と角度から曲率を求め、左右の車輪の速度に反映させる。回避動作時は、現在の進行方向と元々の目標進行方向 θ とにずれが生じるが、壁や街路樹などの障害物に沿って進行することを期待して、目標進行方向 θ を回避動作の度に少しずつ現在の進行方向に近づけるように修正する。

C.3.2 壁面認識

走行実験の結果、100 m 近い長い直線を走行することは、デッドレコニングのみでは誤差が蓄積し難いことが分かった。そこで道の左右の壁に沿うような動作を取り入れた。具体的には、LRF のデータからハフ変換により直線を抽出できた場合には、ロボットの進行方向がその直線と平行になるように移動軌跡の曲率を調整する処理を加えた。

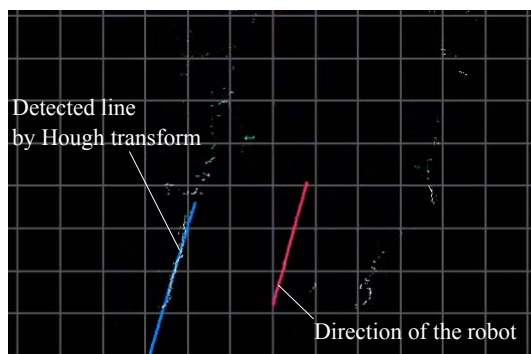


Fig. C.4: Wall detection

C.3.3 白線認識

人通りのある交差点の入口などでは安全性の観点より、白線が引かれ、ロボットは一時停止が求められる。我々は、web カメラより得られる画像から白線を検知することにした (Fig. C.5)。以下に手順を示す。

1. 画像の明るさとコントラストを調節
2. エッジ抽出
3. ハフ変換によって、線分の 2 点の座標を取得 (Fig. C.6)
4. 2 点の画像上の座標をロボットの座標に変換
5. 白線までの残りの距離と白線の傾きが求まるので、白線の手前で停止

(4) では、白線はロボットと同じ平面上にあると仮定し、カメラキャリブレーションにより求めたパラメータや雲台の角度を用いる。(1)-(3) とカメラキャリブレーションなどは、`opencv`[71] を利用した。

C.4 走行実験

Fig. C.7(a) に示す石川台の VBL 棟を含むコースを自律走行させた。無事に一周し、スタート時とゴール時の位置の距離は約 2m であった。白線を引いた場所では白線を認識し、一時停止も成功した。Fig. C.7(b) にデッドレコニングにより求めた自己位置の軌跡を実線で示す。3 目目のウェイポイントから大きく道をそれているが、障害物を利用し進行方向を修正したことで、道なりに走行することができた。

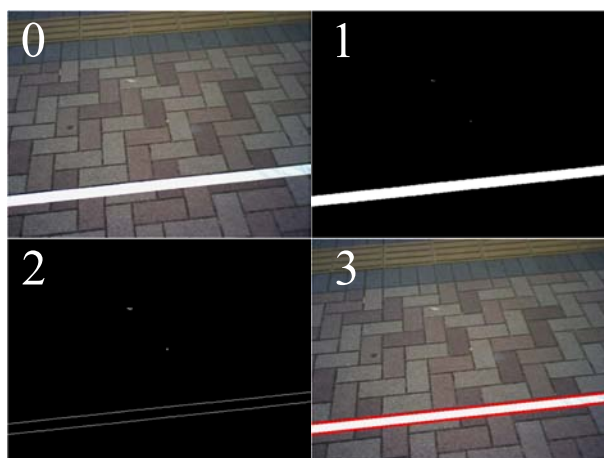


Fig. C.5: Detection of white line (0)Original image (1)Conversion brightness and contrast (2)Canny edge detector (3)Hough transform

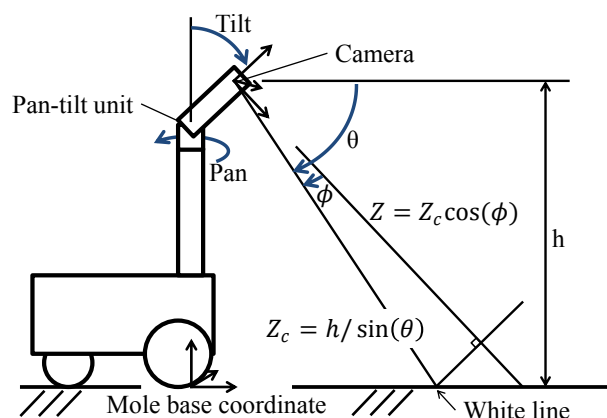
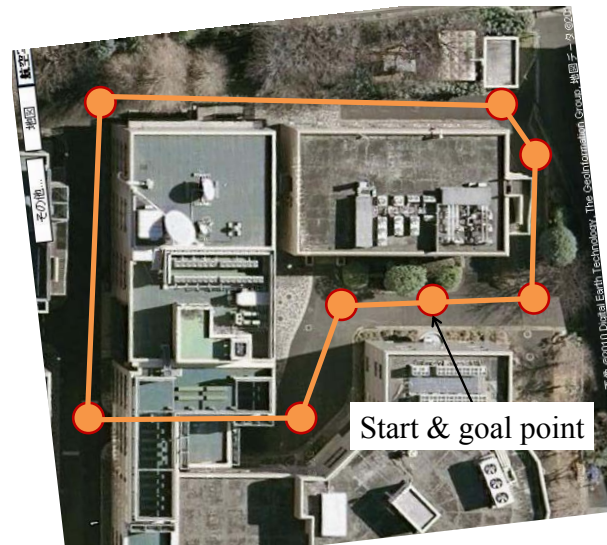
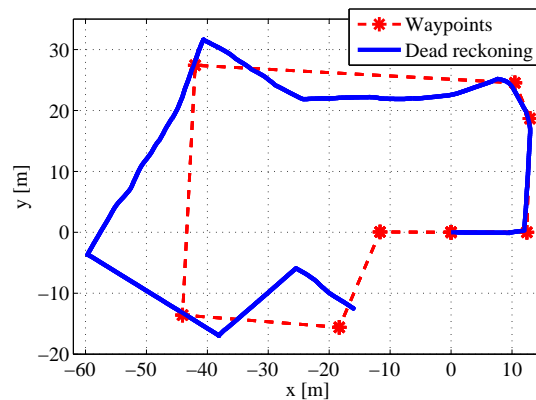


Fig. C.6: Kinematics of detection of white line

本走行では、障害物回避処理のプログラムミスにより出発早々に障害物に衝突してしまったが、トライアルは通過することができた。トライアル走行時にデッドレコニングにより求めた自己位置の軌跡を Fig. C.8(b) に示す。おおよそ目標の軌道に沿っているが、多少のずれは障害物回避や壁面認識により進行方向を修正したことによるものである。



(a) Way point



(b) Trajectory of the robot

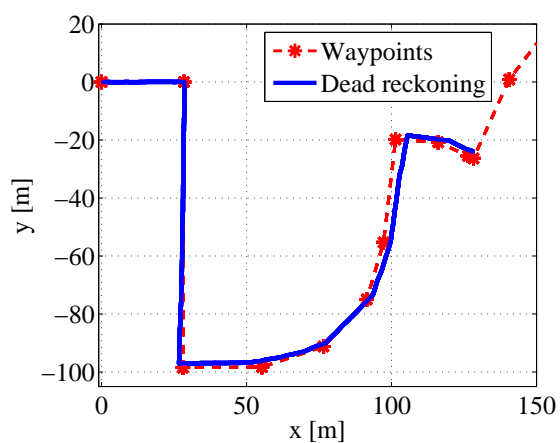
Fig. C.7: Experiment in Ishikawadai

C.5 おわりに

数回の実験走行を通して、デッドレコニングは、特に総走行距離に関しては信頼できるという印象を持った。しかし方角については、落ち葉や点字ブロックなど路面状況によっては計測輪が滑り、誤差を生じた。そのため壁面検出の処理を追加したが、左右のどちらにも明確な壁がない場合には対応できない。また、今回のシステムには与えられたウェイポイントを結ぶように直進する動作と、LRFのデータから反射的にハンドルを切る動作しかなかったため、一度間違った経路に入ると元の経路に戻ることはできない。これらを解決するには、ロボット自身が (1) 壁・柵・溝・標識など様々な情



(a) Way point on google map



(b) Trajectory of the robot

Fig. C.8: Trial run

報を検出して通路の構造を認識し、(2) 認識した通路と予め与えられた経路を比較して自己位置を推定する、という処理が必要であろう。

謝辞

実環境で実験する機会を与えていただいた、つくばチャレンジ委員の方々、ボランティアの方々に感謝いたします。また、駆動車輪やカメラの雲台を貸していただき、筑波まで車を出していただいたサスティナブルロボティクスの桑原氏、上田氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] 杉山栄, “原子力作業ロボット用 4 脚移動システム,” 日本ロボット学会誌, vol. 9, no. 5, pp. 638–643, 1991.
- [2] 東芝, “ニュースリリース (2012-11-21):福島第一原子力発電所向けの 4 足歩行ロボットの開発について.” <http://www.toshiba.co.jp/about/press/2012.11/pr-j2101.htm> (参照 2012-12-09).
- [3] W. Lee, S. Kang, M. Kim and K. Shin, “Rough terrain negotiable mobile platform with passively adaptive double-tracks and its application to rescue missions,” in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1591–1596, 2005.
- [4] C. Marques, J. Cristóvão, P. Lima, J. Frazao, I. Ribeiro and R. Ventura, “Raposa: Semi-autonomous robot for rescue operations,” in *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3988–3993, 2006.
- [5] D. Helmick, S. Roumeliotis, M. McHenry and L. Matthies, “Multi-sensor, high speed autonomous stair climbing,” in *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, vol. 1, pp. 733–742, 2002.
- [6] iRobot, “501 PackBot.” <http://www.irobot.com/us/robots/defense/packbot.aspx> (参照 2012-12-09).
- [7] トピー工業, “Survey Runner(サーベイランナー).” <http://robot.topy.co.jp/product/individual78.html> (参照 2012-12-09).
- [8] K. Nagatani, S. Kiribayashi, Y. Okada, K. Otake, K. Yoshida, S. Tadokoro, T. Nishimura, T. Yoshida, E. Koyanagi, M. Fukushima and S. Kawatsuma, “Emergency response to the nuclear accident at the fukushima daiichi nuclear power plants using mobile rescue robots,” *J. of Field Robotics*, vol. 30, pp. 44–63, 2012.
- [9] K. Jeong, J. Kang, G. Lee, S. Lee, Y. Seo, S. Jung and S. Kim, “A Remotely Operated Robotic System for Urban Search and Rescue,” in *SICE-ICASE, 2006. International Joint Conference*, pp. 3142–3145, 2006.
- [10] Y. Hosoda, H. Yamamoto, M. Hattori, H. Sakairi, T. Iwamoto, M. Oowada, A. Kanno and Y. Saitou, “SWAN’: a robot for nuclear disaster prevention support.,” *Advanced Robotics*, vol. 16, no. 6, pp. 485–488, 2002.
- [11] J. Liu, Y. Wang, S. Ma and B. Li, “Analysis of stairs-climbing ability for a tracked reconfigurable modular robot,” in *IEEE Int. Workshop on Safety, Security, and Rescue Robotics*, pp. 36–41, 2005.
- [12] A. Birk, K. Pathak, S. Schwertfeger and W. Chonnaparamutt, “The IUB Rugbot: an intelligent, rugged mobile robot for search and rescue operations,” in *IEEE Int. Workshop on Safety, Security, and Rescue Robotics*, 2006.

-
- [13] Y. Chiu, N. Shiroma, H. Igarashi, N. Sato, M. Inami and F. Matsuno, “FUMA: environment information gathering wheeled rescue robot with one-DOF arm,” in *IEEE Int. Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics*, pp. 81–86, 2005.
- [14] S. Kobayashi, Y. Kobayashi, Y. Yamamoto, T. Watasue, Y. Ohtsubo, T. Inoue, M. Yasuda and T. Takamori, “Development of a door opening system on rescue robot for search ”UMRS-2007”,” in *proc. of SICE Annual Conf.*, pp. 2062–2065, 2008.
- [15] K. Oka and K. Shibamura, “Development of radiation-proof robot,” in *Advanced Robotics*, vol. 16(6), pp. 493–496, 2002.
- [16] 三菱重工, “2本のアームで作業ができる遠隔作業ロボット「MHI - MEISTeR」を開発.” <http://www.mhi.co.jp/news/story/1212065290.html> (参照 2012-12-09).
- [17] M. Guarnieri, P. Debenest, T. Inoh, E. Fukushima and S. Hirose, “Helios VII: a new vehicle for disaster response-mechanical design and basic experiments,” *Advanced Robotics*, vol. 19, no. 8, pp. 901–927, 2005.
- [18] M. Guarnieri, I. Takao, E. Fukushima and S. Hirose, “HELIOS VIII search and rescue robot: Design of an adaptive gripper and system improvements,” in *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1775–1780, 2007.
- [19] P. Ben-Tzvi, A. Goldenberg and J. Zu, “Design, simulations and optimization of a tracked mobile robot manipulator with hybrid locomotion and manipulation capabilities,” in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2307–2312, 2008.
- [20] M. Guarnieri, R. Kurazume, H. Masuda, T. Inoh, K. Takita, P. Debenest, R. Hodoshima, E. Fukushima and S. Hirose, “HELIOS system: A team of tracked robots for special urban search and rescue operations,” in *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2795–2800, 2009.
- [21] M. Rosheim, *Robot wrist actuators*. Wiley, 1989.
- [22] 鳥居信利, “産業用ロボットの手首機構と特長,” *日本ロボット学会誌*, vol. 5, no. 4, pp. 317–322, 1987.
- [23] C. Gosselin and É. St-Pierre, “Development and experimentation of a fast 3-DOF camera-orienting device,” *The Int. J. of Robotics Research*, vol. 16, no. 5, pp. 619–630, 1997.
- [24] Y. Takeda, H. Funabashi and Y. Sasaki, “Development of a spherical in-parallel actuated mechanism with three degrees of freedom with large working space and high motion transmissibility: Evaluation of motion transmissibility and analysis of working space,” *JSME Int. J. Ser. C*, vol. 39, no. 3, pp. 541–548, 1996.
- [25] W. Li, J. Sun, J. Zhang, K. He and R. Du, “A novel parallel 2-DOF spherical mechanism with one-to-one input-output mapping,” in *Proc. of the 6th WSEAS int. conf. on Robotics, control and manufacturing technology*, pp. 6–11, 2006.
- [26] K. Sone, H. Isobe and K. Yamada, “High Angle Active Link,” *NTN Technical Review*, pp. 70–73, 2003.
- [27] M. E. Rosheim, *Robot evolution: the development of anthropotics*. Wiley, 1994.

- [28] S. Hirose and R. Chu, "Development of a light weight torque limiting M-Drive actuator for hyper-redundant manipulator Float Arm," in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, vol. 4, pp. 2831–2836, 1999.
- [29] Y. Huang, Y. Sasaki, Y. Harakawa, E. Fukushima and S. Hirose, "Development of Anchor Diver III: Easy-to-Operate Tensioned-Tether Type ROV for Underwater Search and Rescue Operations," *J. of Robotics and Mechatronics*, vol. 24, no. 2, pp. 399–407, 2012.
- [30] M. Ogata and S. Hirose, "Study on Ankle Mechanism for Walking Robots -Development of 2 D.O.F. Coupled Drive Ankle Mechanism-," in *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, vol. 4, pp. 3201–3206, 2004.
- [31] 尾形勝, 米田完, 広瀬茂男, "歩行ロボットの足首機構の研究-干涉駆動式 2 自由度能動足首機構の特異点解析," 第 29 回日本ロボット学会学術講演会, 3G17, 2005.
- [32] 新宮恒次郎, 球面三角法. 富山房, 1927.
- [33] C. Gosselin and J. Angeles, "Singularity analysis of closed-loop kinematic chains," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 6, no. 3, pp. 281–290, 1990.
- [34] 武田行生, 舟橋宏明, "ロボット機構の出力の空間的等方性の評価," 日本機械学会論文集. C 編, vol. 61, no. 586, pp. 2636–2642, 1995.
- [35] S. Bai and M. Hansen, "Evaluation of workspace of a spherical robotic wrist," in *Proc. of IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced intelligent mechatronics*, pp. 1–6, 2007.
- [36] L. Zhang, Y. Niu, Y. Li and Z. Huang, "Analysis of the workspace of 2-dof spherical 5r parallel manipulator," in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1123–1128, IEEE, 2006.
- [37] C. Gosselin, "Stiffness mapping for parallel manipulators," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 6, no. 3, pp. 377–382, 1990.
- [38] X. Liu, Z. Jin and F. Gao, "Optimum design of 3-DOF spherical parallel manipulators with respect to the conditioning and stiffness indices," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 35, no. 9, pp. 1257–1267, 2000.
- [39] F. Bidault, C. Teng and J. Angeles, "Structural optimization of a spherical parallel manipulator using a two-level approach," *Proc. of ASME 2001 Design Engineering Technical Conf.*, 2001.
- [40] C. Gosselin and J. Hamel, "The agile eye: A high-performance three-degree-of-freedom camera-orienting device," in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, vol. 1, pp. 781–786, 1994.
- [41] P. Larochelle and J. McCarthy, "Static analysis of spherical nr kinematic chains with joint friction," in *Proc. of ASME Flexible mechanisms, dynamics, and analysis*, vol. 47, pp. 173–177, ASME, 1992.
- [42] C. Chiang, *Kinematics of spherical mechanisms*. Cambridge University Press, 1988.
- [43] 広瀬茂男, 加藤恵輔, "フロートディファレンシャル型トルクセンサの開発," ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, ICI2-6, 1998.
- [44] S. Takaoka, H. Yamada and S. Hirose, "Snake-like active wheel robot ACM-R4.1 with joint torque sensor and limiter," in *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1081–1086, 2011.

-
- [45] K. Nagatani and S. Yuta, "Designing a behavior of a mobile robot equipped with a manipulator to open and pass through a door," *Robotics and autonomous systems*, vol. 17, no. 1-2, pp. 53–64, 1996.
- [46] L. Petersson, D. Austin and D. Kragic, "High-level control of a mobile manipulator for door opening," in *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, vol. 3, pp. 2333–2338, 2000.
- [47] 小菅一弘, "力制御方の分類と制御システムの設計法," *日本ロボット学会誌*, vol. 9, no. 6, pp. 751–758, 1991.
- [48] D. Whitney, "Historical perspective and state of the art in robot force control," in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 262–268, 1985.
- [49] K. Nagatani and S. Yuta, "An experiment on opening-door-behavior by an autonomous mobile robot with a manipulator," in *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, vol. 2, pp. 45–50, 1995.
- [50] M. Guarnieri, P. Debenest, T. Inoh, K. Takita, H. Masuda, R. Kurazume, E. Fukushima and S. Hirose, "Helios carrier: Tail-like mechanism and control algorithm for stable motion in unknown environments," in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1851–1856, 2009.
- [51] Y. Okada, K. Nagatani, K. Yoshida, S. Tadokoro, T. Yoshida and E. Koyanagi, "Shared autonomy system for tracked vehicles on rough terrain based on continuous three-dimensional terrain scanning," *J. of Field Robotics*, vol. 28, no. 6, pp. 875–893, 2011.
- [52] K. Ohno, S. Morimura, S. Tadokoro, E. Koyanagi and T. Yoshida, "Semi-autonomous control system of rescue crawler robot having flippers for getting over unknown-steps," in *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3012–3018, 2007.
- [53] 広瀬茂男, 青木実仁, 三宅潤, "対地適応型 4 クローラ走行車 HELIOS-II の開発," *日本ロボット学会誌*, vol. 10, no. 2, pp. 283–291, 1992.
- [54] H. Nakano and S. Hirose, "Crank-wheel: A Brand New Mobile Base for Field Robots," in *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4608–4613, 2012.
- [55] 広瀬茂男, 本村和寛, "回転ジョイント構造." PublishedPatent, Jun 2007. 特願 2005-351518(2005/12/06), 特開 2007-152500(2007/06/21).
- [56] 本村和寛, 広瀬茂男, "単腕車輪ハイブリッドロボット「槍騎 II 号機」の開発 (機構設計と基礎動作実験)," *設計工学*, vol. 42, no. 9, pp. 527–533, 2007.
- [57] 石井優, "最近のロボットキャリブレーション技術," *日本ロボット学会誌*, vol. 15, no. 2, pp. 164–168, 1997.
- [58] T. Sheridan, *Telerobotics, automation, and human supervisory control*. MIT press, 1992.
- [59] S. Hirai, T. Sato and T. Matsui, "Intelligent and cooperative control of telerobot tasks," *Control Systems Magazine, IEEE*, vol. 12, no. 1, pp. 51–56, 1992.
- [60] T. Fong and C. Thorpe, "Vehicle teleoperation interfaces," *Autonomous robots*, vol. 11, no. 1, pp. 9–18, 2001.
- [61] K. Nagata, Y. Wakita and E. Ono, "Task instruction by putting task information in work space," in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 305–310, 2007.

参考文献

- [62] K. Khokar, K. Reed, R. Alqasemi and R. Dubey, “Laser-assisted telerobotic control for enhancing manipulation capabilities of persons with disabilities,” in *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5139–5144, 2010.
- [63] 坪内孝司, “車輪型移動ロボット制御とサンプリング時間,” *日本ロボット学会誌*, vol. 27, no. 4, pp. 388–391, 2009.
- [64] “OpenGL.” <http://www.opengl.org/> (参照 2012-11-22).
- [65] S. Hirose, H. Tsukagoshi and K. Yoneda, “Normalized energy stability margin and its contour of walking vehicles on rough terrain,” in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, vol. 1, pp. 181–186, 2001.
- [66] 野田幸矢, 上田紘司, 広瀬茂男, “移動作業ロボット HELIOS X の作業視覚システムの開発,” *ロボティクス・メカトロニクス講演会*, 1P1-C09, 2012.
- [67] H. Ishida, T. Hagiwara, K. Ueda and S. Hirose, “Armrest Joystick -Mechanism Design and Basic Experiments-,” in *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5119–5124, 2012.
- [68] M. Raghavan and B. Roth, “Kinematic analysis of the 6R manipulator of general geometry,” in *Proc. Fifth Int. Symposium on Robotics Research*, pp. 263–269, MIT Press, 1991.
- [69] 杉原知道, “Levenberg-marquardt 法による可解性を問わない逆運動学,” *日本ロボット学会誌*, vol. 29, no. 3, pp. 269–277, 2011.
- [70] 油田信一, 橋本秀紀, 田代泰典, “つくばチャレンジ-実世界ロボットチャレンジ: 日常生活環境で自律的に働くロボットを目指して,” 第 25 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3D19, 2007.
- [71] Willow Garage, “OpenCV.” <http://opencv.willowgarage.com> (参照 2012-11-22).

謝辞

本研究を進めるに当たり、ご助力・ご支援を頂いた多くの方々に御礼を申し上げます。

このような非常に興味深いテーマを与えていただき、終始ご指導をいただいた広瀬茂男教授に深く感謝いたします。福島 E. 文彦准教授にはマイコン制御や電子回路、ネットワークなどコンピュータ関連をご指導していただきました。また、本論文について懇切なご指導、ご討論いただいた、機械物理工学専攻 武田行生教授、機械宇宙システム専攻 松永三郎 JAXA 連携教授、機械宇宙システム専攻 野田篤司 JAXA 連携准教授に深く感謝いたします。さらに研究活動にとどまらず、研究室運営から研究生活面でご助言をいただいた遠藤玄助教に感謝致します。先生方には、海外での実験や、デモンストレーションの機会も与えていただき、貴重な経験をさせていただきました。

HELIOS IX の開発者である株式会社 HiBot の Michele Guarnieri 氏、埼玉大学の程島竜一助教、日本工業大学の滝田謙介准教授、EN 工場の伊能崇雄氏に深く感謝いたします。完成度の高いハードウェアのおかげで本研究を進めることができました。Michele さんには電子回路やファームウェアについて度重なる質問にも親切に教えていただきました。程島さんには、ソフトウェアを開発する上で多くのアドバイスとサンプルプログラムをいただきました。程島さんが製作したプログラムをベースに、本研究のソフトウェアを開発してきました。東京工業大学グローバルエッジ研究院の山田浩也助教に感謝致します。山田さんとは本研究の手首機構を共同で開発し、研究の進め方から実践的なノウハウまでいろいろと教えていただきました。また、山田さんと参加したつくばチャレンジでは自律移動ロボットに関する様々な知見が得られ、有意義なものとなりました。HELIOS IX の後継機である HELIOS X をともに開発し、今後さらに研究を進められる博士 1 年石田悠朗氏、現・日立建機の中野寿身氏、修士 1 年野田幸矢氏、学部 4 年堀米篤史氏に感謝いたします。

現・株式会社モリタの黄雅子氏に感謝いたします。水中ロボットの実験や、東北の被災地の水中探索活動に参加させていただきました。また、発表資料の添削や英語も教えていただきました。本研究に関して熱心にご討論いただいた博士 3 年 Ben Allan 氏、博士 3 年 Woosub Lee 氏、博士 2 年小松洋音氏に感謝いたします。そして、研究内容やその周辺技術について共に議論した、研究室の皆様へ感謝致します。

最後に、私の不規則な生活を許し、支えてくださった家族に感謝いたします。

業績一覧

印刷論文

- [1] K. Ueda, M. Guarnieri, T. Inoh, P. Debenest, R. Hodoshima, E. Fukushima, and S. Hirose, “Development of HELIOS IX: An Arm-Equipped Tracked Vehicle,” *J. of Robotics and Mechatronics*, vol. 23, no. 6, pp. 1031–1040, 2011.
- [2] K. Ueda, H. Yamada, H. Ishida and S. Hirose, “Design of Large Motion Range and Heavy Duty 2-DoF Spherical Parallel Wrist Mechanism,” *J. of Robotics and Mechatronics*. (採録決定)

査読つき国際会議

- [1] K. Ueda, M. Guarnieri, R. Hodoshima, E. Fukushima, and S. Hirose, “Improvement of the remote operability for the arm-equipped tracked vehicle HELIOS IX,” in *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 363–369, 2010.
- [2] H. Ishida, T. Hagiwara, K. Ueda, and S. Hirose, “Armrest Joystick -Mechanism Design and Basic Experiments,” in *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5119–5124, 2012.

その他の口頭発表

- [1] 上田紘司, M. Guarnieri, 程島竜一, 福島 E. 文彦, 広瀬茂男, “アーム搭載クローラロボット HELIOS IX の研究-センサを用いた環境適応動作,” 第 10 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2M2-4, 2009.
- [2] 上田紘司, M. Guarnieri, 伊能崇雄, P. Debenest, 滝田謙介, 程島竜一, 福島 E. 文彦, 広瀬茂男, “アーム搭載クローラロボット HELIOS IX の開発-全体構成とトルク制御による対地適応動作 -,” 第 29 回日本ロボット学会学術講演会, 1B2-8, 2011.
- [3] 石田悠朗, 萩原哲夫, 上田紘司, 広瀬茂男, “アームレストジョイスティックの開発 手先姿勢操作機構の設計と製作,” ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2A1-P08, 2012.
- [4] 野田幸矢, 上田紘司, 広瀬茂男, “移動作業ロボット HELIOS X の作業視覚システムの開発,” ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1P1-C09, 2012.
- [5] 上田紘司, 山田浩也, 石田悠朗, 広瀬茂男, “大荷重支持 2 自由度球面リンク機構を用いた防塵型手首機構の開発,” 第 30 回 日本ロボット学会学術講演会, 2A3-3, 2012.

関連しないもの

- [1] Y. Huang, K. Ueda, K. Itoh, E. Fukushima and S. Hirose, “Development of tether mooring type underwater robot,” in *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 267–272, 2009.
- [2] Y. Huang, K. Ueda, K. Itoh, Y. Sasaki, P. C. Debenest, E. F. Fukushima and S. Hirose, “Development of Tether Mooring Type Underwater Robots: Anchor Diver I and II,” in *Proc. of 3rd Int. Conf. on Underwater System Technology: Theory and Applications 2010 (USYS’10)*, pp. 168–173, 2010.
- [3] Y. Huang, K. Ueda, K. Itoh, Y. Sasaki, P. Debenest, E. Fukushima and S. Hirose, “Development of tether mooring type underwater robots: Anchor diver I and II,” *Indian J. of Geo-Marine Sciences*, vol. 40, no. 2, pp. 181–190, 2011.