

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	高いユーザビリティと携帯性を実現するロボット遠隔操縦桿の研究
Title(English)	Study of the robot remote controller with high usability and portability
著者(和文)	石田悠朗
Author(English)	Hiroaki Ishida
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10142号, 授与年月日:2016年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:遠藤 玄,鈴森 康一,小田 光茂,葭田 貴子,菅原 雄介,福島 E 文彦
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10142号, Conferred date:2016/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

平成 27 年度 学位論文

高いユーザビリティと携帯性を実現するロボット遠隔操縦桿の研究

東京工業大学 理工学研究科 機械宇宙システム専攻
石田 悠朗

目次

第 1 章	緒論	1
1.1	災害対策の現状	1
1.2	災害対策用ロボット	3
1.3	災害対策用ロボットの遠隔操縦桿	6
1.3.1	遠隔操縦桿の分類	6
1.3.2	災害対策用ロボットの次世代操縦桿への要求	13
1.4	本研究の目的	14
1.5	本論文の構成	14
1.6	まとめ	15
第 2 章	ロボット遠隔操縦桿 Armrest Joystick の提案	17
2.1	Armrest Joystick の提案	17
2.1.1	高いユーザビリティと携帯性を旨とした遠隔操縦桿の従来研究	17
2.1.2	Armrest Joystick の提案	18
2.2	まとめ	20
第 3 章	Armrest Joystick の詳細設計と開発	23
3.1	3 自由度位置操作部の詳細設計	23
3.1.1	3 自由度位置操作部の機構検討	23
3.1.2	3 自由度位置操作部のための腕部の動作検証	26
3.1.3	3 自由度位置操作部の第一次試作の機構設計	29
3.1.4	3 自由度位置操作部の第二次試作の機構設計	35
3.2	3 自由度姿勢操作部の詳細設計	45
3.2.1	3 自由度姿勢操作部の機構検討	45
3.2.2	3 自由度姿勢操作部の機構設計	47
3.3	グリッパ開閉操作部の詳細設計	53
3.3.1	グリッパ開閉操作部の機構検討	53
3.3.2	グリッパ開閉操作部のための指先の動作検証	54
3.3.3	グリッパ開閉操作部の機構設計	55
3.4	Armrest Joystick の全体構成	60

3.5	Armrest Joystick の制御システムの設計開発	61
3.5.1	Armrest Joystick の制御システム構成	61
3.5.2	Armrest Joystick を用いたロボットの制御	62
3.5.3	制御システム上のその他の要素	63
3.6	まとめ	65
第 4 章	性能検証実験	67
4.1	携帯性に関する評価実験	67
4.2	バイラテラル制御の位置再現性能の評価実験	67
4.3	自重補償機構の性能評価実験	71
4.3.1	自重補償機構の精度測定実験	71
4.3.2	自重補償機構による操縦者への影響の評価実験	73
4.4	バイラテラル制御の力再現性能の評価実験	79
4.5	ユーザビリティに関する評価実験	82
4.5.1	レスキューロボット Helios IX	82
4.5.2	レスキューロボット Helios X	83
4.5.3	車両機構操作実験	84
4.5.4	カメラ機構操作実験	85
4.5.5	ロボットアーム操作実験	86
4.5.6	ジョイスティック方式操縦桿とのユーザビリティの比較評価実験	88
4.5.7	遠隔操作時のバイラテラル制御の評価実験	92
4.5.8	遠隔操作時の自重補償機構の評価実験	95
4.6	まとめ	99
第 5 章	結論と今後の課題	101
5.1	結論	101
5.2	今後の課題	102
付録 A	Armrest Joystick の逆運動学解析	105
A.1	3 自由度位置指令部の逆運動学解析	105
A.2	3 自由度姿勢指令部の逆運動学解析	106
参考文献		109
業績一覧		117
謝辞		119

目次

1.1	Great east japan earthquake	1
1.2	Humanitarian demining	2
1.3	Quince (Ref.[15])	4
1.4	Toshiba quadruped robot (Ref.[15])	4
1.5	Raccoon (Ref.[15])	4
1.6	mini surveyor (Ref.[17])	4
1.7	Gengo ROV (Ref.[15])	4
1.8	PackBot (Ref.[15])	4
1.9	JAXON (Ref.[21])	5
1.10	HAL (Ref.[12])	5
1.11	HRP-1 Super cockpit (Ref.[30])	6
1.12	Obayashi remote controller for the heavy machinery (Ref.[31])	6
1.13	Graphic user interface of the Helios IX	7
1.14	The back hoe model	7
1.15	Standard operation manual for the back hoe	7
1.16	Kinect controller for the humanoid robot (Ref.[46])	9
1.17	Mine Hand-3	9
1.18	Remote controller for the TITAN IX's arm	9
1.19	HRP-3P and the portable mater control system (Ref.[54])	11
3.1	Weight compensation mechanism with a counter weight	25
3.2	Weight compensation mechanism with a spring	25
3.3	Principle of the weight compensation mechanism with the non-circular pulley	25
3.4	Movement analysis of a shoulder and elbow	26
3.5	Axis arrangement for the 3DOF position controller	27
3.6	Serial link structure	28
3.7	Parallel link structure	28
3.8	Prototype of the 3DOF position controller	29
3.9	Mobile form of the prototype for the 3DOF position controller	30

3.10	Wrist and gripper controller of the prototype for the 3DOF position controller	30
3.11	Weight compensation mechanism of the prototype for the 3DOF position controller	31
3.12	Calculation model of the prototype for the 3DOF position controller	31
3.13	Torque profile (τ_1)	32
3.14	Torque profile (τ_2)	33
3.15	Mechanism of the weight compensation mechanism for the prototype of the 3DOF position controller	33
3.16	Position Controller of the Armrest Joystick	35
3.17	Mechanism of the 3DOF position controller	36
3.18	Workrange along X direction on the position controller	37
3.19	Workrange around Yaw axis on the position controller	37
3.20	Workrange along Z direction on the position controller	37
3.21	Calculation model of the Armrest Joystick	38
3.22	Gravity moment (τ_2)	39
3.23	Mechanism of the weight compensation mechanism with the circular pulley	40
3.24	Moment trajectory (τ_2)	41
3.25	Gravity Moment (τ_3)	41
3.26	Procedure to derive the non-circular pulley	42
3.27	Moment trajectory (τ_3) (Spring : SWL20 – 125)	43
3.28	Moment trajectory (τ_3) (Spring : SWL20 – 150)	43
3.29	Moment trajectory (τ_3) (Spring : SWL22 – 125)	44
3.30	Moment trajectory (τ_3) (Spring : SWL22 – 150)	44
3.31	Non-Circular Pulley for the 3DOF position controller on the Armrest Joystick	45
3.32	Overview of the 3DOF posture controller	47
3.33	Mechanism of the 3DOF posture controller	48
3.34	Workrange around Roll axis on the posture controller	49
3.35	Workrange around Pitch axis on the posture controller	49
3.36	Workrange around Yaw axis on the posture controller	49
3.37	Serial linkage model for the posture controller	50
3.38	Pararell linkage model for the posture controller	50
3.39	2DOF parallel linkage model	51
3.40	Singular posture of the 3DOF posture controller	51
3.41	Mechanical stopper at roll axis	52
3.42	Problem of a finger controller with a simple mechanism	53

3.43	Measurement of the fingers' joints workrange at the pinching motion	54
3.44	5-bar linkage gripper controller	55
3.45	Gripper controller mechanism	56
3.46	Workrange of the gripper controller mechanism	56
3.47	Calculation model of the gripper controller	57
3.48	Output force trajectory ($L_1 = 31, L_2 = 54$)	58
3.49	Output force trajectory ($L_1 = 27, L_2 = 56$)	59
3.50	Armrest Joystick	60
3.51	Mobile form of the Armrest Joystick	61
3.52	Mechanical and electrical connectors of the Armrest Joystick	61
3.53	System architecture of the Armrest Joystick	62
3.54	Coordinate system of the Armrest Joystick	63
3.55	Graphic user interface for the Helios X controller	64
3.56	3-buttons USB foot switch	64
4.1	Control diagram of the position feedback control for the Armrest Joystick	68
4.2	Measurement of the trajectory along X direction	69
4.3	Measurement of the trajectory along Y direction	69
4.4	Measurement of the trajectory along Z direction	69
4.5	Measurement of the trajectory around Roll axis	69
4.6	Measurement of the trajectory around Pitch axis	69
4.7	Measurement of the trajectory around Yaw axis	70
4.8	Workrange of the 3DOF position controller	72
4.9	Residual force vectors at the tip of the Armrest Joystick	72
4.10	FREEEMG1000	74
4.11	Desired tip position of the position controller	74
4.12	Calculation model of the elbow displacement by the joint height	76
4.13	Average EMG amplitude when the operators moved the controller along X direction (* : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$)	77
4.14	Average EMG amplitude when the operators moved the controller along Y direction (* : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$)	77
4.15	Average EMG amplitude when the operators moved the controller along Z direction (* : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$)	77
4.16	Control diagram of the force reflection control for the Armrest Joystick	79
4.17	Output force measurement along X, Y and Z direction of the position controller	80

4.18	Output torque measurement around Roll, Pitch and Yaw axis of the posture controller	80
4.19	Output force measurement of the gripper controller	80
4.20	Result of the force measurement along X, Y and Z direction	81
4.21	Result of the torque measurement around Roll, Pitch and Yaw axis	81
4.22	Result of the force measurement for the finger controller	81
4.23	Helios IX	82
4.24	Remote controller of the Helios IX	83
4.25	Helios X	84
4.26	Forward and back control of the crank wheel on the Helios X	85
4.27	Yaw control of the crank wheel on the Helios X	85
4.28	Chilt control of the camera system on the Helios X	85
4.29	Right and left control of the camera system on the Helios X	86
4.30	Forward and back control of the camera system on the Helios X	86
4.31	6DOF control of the ZAHN arm on the Helios X	87
4.32	Gripper control of the ZAHN arm on the Helios X	88
4.33	Experiment to make the Helios IX move the bottle	89
4.34	Average task time of the experiment when the operators made the Helios IX move the bottle (* : $p < 0.05$)	91
4.35	Experiment to make the Helios IX grab the can with the weight	92
4.36	Operation time when the operators made the Helios IX grab the can with the weight	93
4.37	Gripper count and current of the experiment when the operators made the Helios IX grab the can with the weight	93
4.38	Average gripper encoder count of the experiment when the operators made the Helios IX grab the can with the weight	94
4.39	Average gripper current of the experiment when the operators made the Helios IX grab the can with the weight (** : $p < 0.01$)	94
4.40	Experiment to make the Helios X mark the targets	95
4.41	Average time of the experiment when the operators made the Helios X mark the targets	97
4.42	Average distance error of the experiment when the operators made the Helios X mark the targets (* : $p < 0.05$)	97
4.43	Average EMG amplitude of the experiment when the operators made the Helios X mark the targets (* : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$)	98
A.1	Upper view of the position controller	105
A.2	Side view of the position controller	105

A.3	Coordination system of the posture controller	106
A.4	Upper view of the posture controller	107
A.5	Front view of the posture controller	107

表目次

1.1	Comparison of the remote controller	12
3.1	Specification of the prototype for the 3 Position Controller	29
3.2	Specification of the 3DOF position controller	35
3.3	Specification of the springs for the weight compensation mechanism .	42
3.4	Selection table of the springs for the weight compensation mechanism	43
3.5	Compensation rate of the selected springs for the weight compensation mechanism	44
3.6	Specification of the 3DOF posture controller	47
3.7	Finger's joint workrange	54
3.8	Specification of gripper controller	57
4.1	RMS value of the difference between the desired and measured posi- tions and postures	70
4.2	Muscle contribution for the shoulder and elbow movement	75
4.3	Displacement of height at the joint when the operator moved the controller	76
4.4	P-value of the Wilcoxon signed rank test for the EMG amplitude when the operators moved the Armrest Joystick	78
4.5	Specification of the Helios IX	83
4.6	Specification of the Helios X	84
4.7	Displacement of height at the joint when the operators made the Helios X mark the targets	96
4.8	P-value of Wilcoxon signed-rank test for the working time and the distance error of the experiment when the operators made the Helios X mark the targets	99
4.9	P-value of Wilcoxon signed-rank test for EMG amplitude of the ex- periment when the operators made the Helios X mark the targets . .	99

第1章

緒論

本章では、まず、世界中で問題となっている災害の現状を紹介し、現場で要求されている作業について述べる。次に、災害対策として今までに開発されてきたロボットと制御技術を取り巻く課題と、それらの課題を解決するための遠隔制御技術の従来の研究開発について概観する。そして、次世代の操縦桿に要求される技術課題と本研究の目的を明らかにしている。

1.1 災害対策の現状

世界で起こる様々な災害は、自然の活動により引き起こされる災害（自然災害）と人間の活動により引き起こされる災害（人的災害）の2つに分類することができる（文献 [1]）。まず、自然災害は地震、津波、台風、火山噴火等が挙げられる。これらは1つの災害の規模が非常に大きく、その危険性も非常に高い。特に、瓦礫や熱、有毒ガス等の様々な要因が、人間への被害をもたらす。近年では、1995年の阪神淡路大震災や、2011年に発生した東日本大震災（図 1.1）とそれに伴って引き起こされた津波による被害、特に福島第一原子力発電所における様々な災害が代表的である（文献 [2] [3] [4]）。



Fig.1.1 Great east japan earthquake

一方の人的災害は、爆弾テロや毒ガステロのような屋内で発生する小規模なものから、対人地雷、対戦車地雷による大規模なものまで幅広く存在する。人的災害は先程の自然災

害と比べた場合に、一つ一つの規模が小さいものの、対象への対処方法の複雑さや威力の強烈さは自然災害のものよりも大きいこともあり、その対応は非常に難しい問題である。こちらの例としては、2009年のアメリカ同時多発テロや、1995年に発生した東京地下鉄サリン事件、現在世界中に点在する地雷原で行われている人道的地雷除去活動（図 1.2）並びに、各国で軍事用に実行されている軍事的地雷除去活動が有名である（文献 [5] [6] [7] [8] [9]）。



Fig.1.2 Humanitarian demining

こういった現場で人間が対処活動を行うにあたって求められる作業は、現場に応じてそれぞれ異なるものの、現在では代表的なものとして以下のような作業が挙げられている（文献 [4] [10]）。

- 瓦礫踏破
- 階段踏破
- 周囲環境計測
- ドアの通り抜け
- バルブ開閉
- 瓦礫除去
- 壁面洗浄
- 試料回収
- 制御盤操作

現状では、これらの作業に対して、警察や消防、軍隊から派遣された人員が、分厚くて重い防護服を身につけた上で、様々な作業用ツールを個別に持ち込んで対応しているため、作業員への肉体的・精神的負荷が非常に大きな問題となっている（文献 [11]）。実際に、福島第一原子力発電所での初期対応や廃炉計画では、放射線を半減させる効果を持つタングステン製防護服を着て作業しているが、その重量は最大で 40～60 kg もあり、クーラーを使用できない夏場の作業となると、作業員への肉体的負担は想像以上のものである（文献 [12]）。また、作業現場は危険と常に隣り合う場所であり、作業員には緊張感が常時求められ、長時間作業を続けているうちに徐々に作業員に疲労がたまり、ヒューマンエ

ラーから重大な二次災害を引き起こしていることも現在までに 40 件ほど報告されている (文献 [13]). しかし, このような現状への対応策として行われている手段は, 現状では作業員の時間管理を徹底するという方法だけである (文献 [11][13][14]). 例えば, 福島第一原子力発電所における作業は, 線量の多い場所では 2 時間の作業を休憩を挟みつつ, 一日二回程度までに留める, といったように簡易的に管理されているにすぎない. このように作業進行が厳しく管理されている中では, 早期に解決が求められる作業でも作業効率も下がりがちで, 作業の効率向上という面でもさらなる対策の導入が強く望まれている.

1.2 災害対策用ロボット

前節で求められる作業は非常に危険で, 作業員への負担が大きいため, 現場に人員ではなく, 代理で作業を行う災害対策用ロボットを送り込むことが進められている (文献 [15]). 災害対策用ロボットの一例として, 災害現場で求められる作業に対し, 今日まで提案されたロボットを以下に示す.

- 車両型偵察ロボット

Quince 1,2,3 (千葉工業大学, 東北大学, 国際レスキューシステム研究機構) (図 1.3), レーザースキャン搭載ロボット (日立 GE), Rosemary (千葉工業大学, 日立 GE), Sakura (NEDO, 千葉工業大学, 日立 GE), SC-ROV (東芝), Survey Runner (トピー工業), 高所調査用ロボット (ホンダ, 産業技術総合研究所) (文献 [15])

- 歩行ロボット

Big Dog (Boston Dynamics) (文献 [16]), 4 足歩行ロボット (東芝) (文献 [15]) (図 1.4)

- 索状ロボット

形状変化型ロボット (日立 GE), ラクーン (アトックス) (図 1.5), サソリ型調査ロボット (東芝) (文献 [15])

- 無人航空機 (UAV)

mini surveyor (ミニサーベイヤーコンソーシアム) (文献 [17]) (図 1.6), 災害調査用地上/空中複合型ロボットシステム (日立製作所) (文献 [18])

- 水中ロボット (ROV)

Anchor Diver III (東京工業大学), SeaBotix (CRASAR) (文献 [19]), げんご ROV (日立 GE) (図 1.7), トライダイバー (日立 GE) (文献 [15])

- アーム搭載型ロボット

ASTACO-SoRa (日立 GE), MEISTeR (三菱重工業), Packbot (iRobot) (図 1.8), 櫻式号 (千葉工業大学), Talon (QinetiQ), Warrior (iRobot) (文献 [15])

- ヒューマノイドロボット

Atlas (Boston Dynamics) (文献 [20]), HRP-2 (産業技術総合研究所), HYDRA (東京大学), JAXON (東京大学) (文献 [21]) (図 1.9)

- パワーアシストスーツ

HAL (CyberDyne) (文献 [12]) (図 1.10), 重装備用スーツ (防衛技術研究所) (文献 [22]), パワーアシストスーツ (三菱重工業) (文献 [23])



Fig.1.3 Quince (Ref.[15])

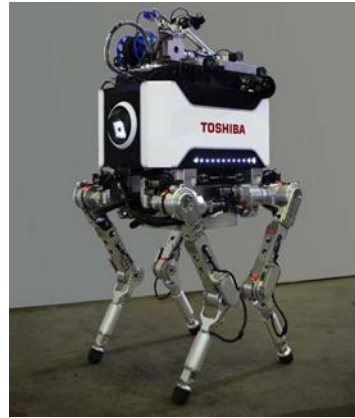


Fig.1.4 Toshiba quadruped robot (Ref.[15])



Fig.1.5 Raccoon (Ref.[15])



Fig.1.6 mini surveyor (Ref.[17])



Fig.1.7 Gengo ROV (Ref.[15])



Fig.1.8 PackBot (Ref.[15])



Fig.1.9 JAXON (Ref.[21])



Fig.1.10 HAL (Ref.[12])

これらのロボットは、各々で運用思想が異なり、大まかに調査用途と作業用途に分類することができる(文献[24])。以下にそれぞれの特徴を述べる。

まず、前者4つのロボットは、現場の状態(障害物の散乱状態、放射線やガス濃度の調査、危険物の有無)の情報収集を主目標とし、通常の地面だけではなく、パイプ内や高所、水中といった調査が必要とされる様々な場所へのアクセスに特化した形態をとることが多い(文献[15][16][17][18][19])。したがって、特定の場所での特殊な移動機能を持つことが多く、もう一方の作業用途のロボットと異なって、使用箇所が限定されてしまうこともある。

次の2つのロボットは、主に作業を行うことを目標とし、状況に応じて様々な場所に臨機応変に対応できる車両や歩行機に加えて、汎用的に使用可能な作業用ロボットアームを備えた形態となる(文献[15][20][21])。本来人間が行う作業をロボットで汎用的に代替する事になるため、ロボットの大きさや形状が非常に似通ったものとなる。今後、福島原子力発電所の廃炉作業において、線量の多い場所ではロボットによって作業が進められることも踏まえると、今後研究・実用化されていくロボットの中では、この形態が占める割合は非常に大きくなると予測される。

最後に、近年では人間がロボットを着用して、人間が本来可能な作業領域を大きく広げることができる、パワーアシストスーツに関する研究や実用化が非常に多くなっている(文献[12][22][23])。パワーアシストスーツは、人間が直接現地に赴く必要があり、危険な状況にさらされる可能性が非常に高いため、使用状況が限定されてしまう。しかし、人間が現場に直接居合わせることで得られる高度な分析力、判断力といった環境に対応する能力が高く、その実用化を望まれている。

ここまで、現状の実用化されたロボットを概観したが、近年はパワーアシストスーツが盛んに開発されている現状を考慮すると、現状ではロボット単体が作業を全て自動化して行うことは非常に難しい、と言わざるをえない。例えば、ロボットが移動の経路や姿勢を決定するだけでも、適切に制御されなければロボットは簡単に転倒することや、ロボットアームを使用した作業では、人間の判断による補助がなければ適切に対応できない(文

献 [25]). したがって、様々な現場でロボットが早急に求められている現状では、ロボットを全て自動化するのではなく、人間がロボットを遠隔操作することを基本として、その作業性能の向上のために、操作の一部に対して自動化を導入するシェアド・オートノミが実際の運用の主流となっている (文献 [26]). このような状況を鑑みると、要求された作業に対応するためには、ロボットの性能向上だけではなく、ロボットを遠隔操作するための操縦桿の性能も非常に重要となる。

1.3 災害対策用ロボットの遠隔操縦桿

1.3.1 遠隔操縦桿の分類

災害現場において、人間が災害対策用ロボットを用いるには、遠隔操縦桿が必須となるが、ここではその操縦桿について広くその現状を紹介する。まず、遠隔操縦桿は、操縦者側の情報をロボットに入力する入力デバイスと、ロボットからの情報を操縦者に掲示する掲示デバイスに分類される (文献 [27] [28]). 入力デバイスは後で詳細を述べることとし、最初に掲示デバイスについて述べる。

操縦者は掲示デバイスを介してロボット側の環境を認識することとなるため、正確な情報を伝えなければ、遠隔作業にも支障が及ぶこととなる。人間の環境認識に対する五感の依存度は、視覚：70～80 %，聴覚：10～20 %，触覚：5 %，嗅覚：3 %，味覚：2 % (文献 [29]) と言われており、比重が高い順番で遠隔操作システムにおける掲示の重要性は高いと言える。特に、視覚は非常に重要視されており、古くから視覚の立体化 (文献 [30]) (図 1.11)、多視点化 (文献 [31]) (図 1.12) やレーザーレンジファインダやサーモグラフィといった複数のセンサを利用する (文献 [32] [33]) (図 1.13) ことによって、操縦者へのより正確でかつ多様な伝達手法が様々な検討されている。視覚に比べると、現状では聴覚以下の感覚の利用は災害対策用としてではなく、遠隔コミュニケーションツールとして研究・実用化検討されていることが多い (文献 [34] [35] [36])。



Fig.1.11 HRP-1 Super cockpit (Ref.[30])



Fig.1.12 Obayashi remote controller for the heavy machinery (Ref.[31])



Fig.1.13 Graphic user interface of the Helios IX

次に、入力デバイスは、遠隔操作システムの中心を担っていて、現在までに様々な操縦桿が提案されている。例として、バックホウやクレーンといった建設機械や、産業用、宇宙用、災害対策用ロボット、また腹腔内手術用ロボット等の操縦桿が挙げられる。

まず、建設機械の操縦桿について詳細を述べる。建設機械では、国土交通省が標準操作方式という名称で操作方法の共通化を行っている（文献 [37]）。一例として、バックホウの標準操作方式を紹介する。バックホウのアームの各自由度（図 1.14）に対して、図 1.15 のとおりに操縦桿のジョイスティックの各自由度を対応させ、各軸ごとに速度を制御して操作する。他の建設機械では、ジョイスティックではなくボタンを利用してロボットアームの各自由度を操作する場合もある。この方法を代表とし、ロボットを構成する複数個連なっているアクチュエータをそれぞれ個別に駆動し、各関節の速度を直接操作する操作方式は一般に「各軸スイッチ方式」と呼ばれている（文献 [27]）。この方式では、手先を直接操作することが一切できないため、作業対象とロボットの関係を把握することが難しく、実際に操作を行うためには操縦者に相当の練度が必要で、初心者が操作を行うことや視覚が制限された場所から遠隔操作を行うことが非常に難しい。

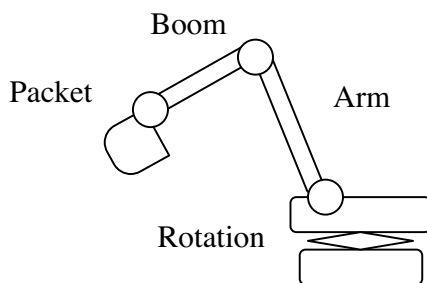


Fig.1.14 The back hoe model

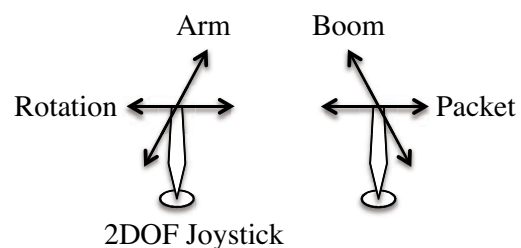


Fig.1.15 Standard operation manual for the back hoe

次に、産業用、宇宙用、災害対策用として用いられているロボットアームでは操作方法が標準化されていないが、操作時にはジョイスティックや複数のボタンを設けた操作盤によって、ロボットアーム先端の位置と姿勢の速度がジョイスティックやボタンで制御される（文献 [38][39][40]）。この方式は各軸スイッチ方式とは異なって、ロボットアームの各自由度を個別に操作するのではなく、先端の位置や姿勢に対して制御を行うことから、操

作がより簡単になると言われている。このように先端の位置と姿勢の速度を制御する方式は、一般に「ジョイスティック方式」と定義されている（文献 [27]）。しかし、ジョイスティック方式も位置と姿勢そのものの操作ではなく、手先の位置と姿勢の増分を操作する方式であり、繊細な作業に移るほどその操作は難しくなると言われている。この方式で用いる機器は一般に市販されているジョイスティックだが、1つのジョイスティックの自由度がたかだか3自由度であるため、実際にマニピュレータを空間上で操作するためには最低6自由度必要になることとなり、ジョイスティックを2つ以上使用することでようやく操作が可能となる。よって、2つのジョイスティックで同時に操作することとなり、操縦者には正確な状況把握能力が求められるため、やはり操縦者には相当の練度が必要と言われている。したがって、緊急性が重要な要素になる災害現場で実際に使用した場合にも、大幅に速度を抑えた操作にならざるをえないため（文献 [41]）、操作方法には改良の余地がある。一方で、ジョイスティックでは手先の速度を入力することとなるため、ロボットの大きさに比べて操縦者側の占有体積を小さくすることができ、日々災害が起こる可能性を考慮すれば、操縦桿をコンパクトに設計でき、現場に搬入し易いことは大きな利点である。さらに、ロボット側の力やトルクをセンサで計測して、操縦桿側でそれらを表現して操縦者に伝えるフォース・フィードバックといったバイラテラル制御が実装可能なものも提唱されているが（文献 [42]）、ジョイスティックは実際のロボットと構造が異なるため、操縦者がある感覚から状況を判断するためには、脳内で揭示情報に対しての複雑な変換作業を必要とする。

最後に、腹腔内手術用ロボットでは、腹腔内のロボットと似た機構を持つ操縦桿を使用している（文献 [43][44][45]）。この操縦桿では、操縦桿の位置と姿勢が手術用ロボットの先端の位置と姿勢に対応して動き、操縦者がロボットと一体となって直接作業をする形態に近くなる。したがって、ジョイスティック方式に比べて、より操作が簡単になると言われている。このようにロボット（スレーブ）に据え付けられるロボットアームと同様の多リンク機構によって構成される操縦桿で、手先の位置や姿勢を一対一に対応させることで、操縦者（マスタ）がロボットになったかのような直観的な操作を可能にする方式は、「マスタ・スレーブ方式」と定義されている（文献 [27]）。

また、この方式の操縦桿では、制御対象が1つのロボットアームに制限されると認識されていることも多いが、実際には手先の位置・姿勢操作の情報を用いて操作を行い、ロボットアーム以外にもカメラシステム、車両の操作にも対応させることができ、汎用的に使用可能である。さらに、操縦桿の構造によってはジョイスティックのような使用方法も提供することが可能で、その汎用性はさらに高くなる。マスタ・スレーブ方式の操縦桿のさらなる特徴として、スレーブ側の力やトルクをセンサで計測して、マスタ側でスレーブ側の環境をリアルに再現して操縦者に伝えるフォース・フィードバックも実装でき、これによって操縦者はさらに臨場感の高い操作が可能となる。一方で、マスタ側にもスレーブ側と同等な多リンク機構を必要とし、位置や姿勢を直接操作する空間が要求されるため、各軸スイッチ方式やジョイスティック方式に比べて操縦者側の占有体積が広がって、携帯性が損なわれたり、設置可能な環境を限定されることが欠点として存在する。近年で

は、操縦桿自体にリンク構造を持たず、モーションキャプチャの原理を利用した操縦デバイスも徐々に実現されている（文献 [46][47]）（図 1.16）。しかし、現状ではこれらのデバイスでロボットを操作する際の入力方法が手先の位置・姿勢入力で行われていること、フォース・フィードバックを実装するには揭示用の多リンク機構を導入する必要があることから、現状ではマスタ・スレーブ方式の一部に該当すると考えられる。

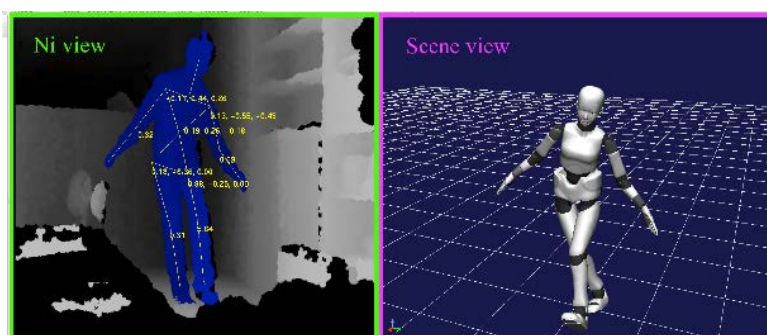


Fig.1.16 Kinect controller for the humanoid robot (Ref.[46])

マスタ・スレーブ方式の操縦桿についてさらに詳細を述べる。このマスタ・スレーブ方式の操縦桿は、スレーブ側とマスタ側が機械的に接続されている機械式と、双方が電氣的に接続されている電気式に分類することができる（文献 [27]）。

- 機械式（図 1.17）
- 電気式（図 1.18）



Fig.1.17 Mine Hand-3



Fig.1.18 Remote controller for the TITAN IX's arm

機械式マスタ・スレーブ操縦桿は、マスタ側とスレーブ側が何らかの機構要素によって機械的に結合されていることが大きな特徴である。したがって、全ての構造が機械要素で構成できることもあり、1940年代の非常に古くから研究が続けられている。この方式は全てが機構的に実現されているため、電気回路や制御が介在せず、もう一つの電気

式に対してシステム全体をシンプルに構成できることも特徴である。その特徴を活かして、バイラテラルの性能については、スレーブ側の力を機構を通じてダイレクトにマスタ側に伝えることができ、スレーブ側の反力を非常にリアルに認識することができる。これらの直観的な操作・バイラテラル性は、後述の電気式に比べて未だに十分に優れていると言われている。しかし、マスタ側とスレーブ側を機械要素で接続しているため、双方間の距離を大きく離すことが難しく、操縦者を危険に晒す場所では使用に適さない。さらに、機構要素が多くなって占有空間が大きくなってしまい、現場へ持ち運ぶことが難しいといった問題や、操作やバイラテラル性に関してのマスタ側とスレーブ側の比率を大きく変えることができず、対象となる作業に限界が多いといった問題が残されている。機械式のマスタ・スレーブ方式操縦桿としては、核燃料を扱うために使用されている Bhabha Atomic Research Centre の Three-Piece Master Slave Manipulator (文献 [48]) や Central Research Laboratories の Model M8 (文献 [49])、地雷除去用の Minehand (文献 [50]) (図 1.17) が提案されている。

次に、電気式マスタ・スレーブ操縦桿はマスタ側とスレーブ側が電氣的に接続されることが特徴である。この方式では、マスタ側とスレーブ側双方の電氣的な接続さえ保たれば操作が可能となるため、両者の距離を簡単に切り離すことができ、遠隔操作の適用範囲を飛躍的に向上させることができる。その距離は、地上から宇宙衛星に搭載されたロボットアームを遠隔操作した事例や、海を隔てた遠隔地から手術を施術した例もある (文献 [51])。さらに、操作範囲を制御によって簡単に変更できるため、マスタ側の操縦桿をスレーブ側のロボットに比べて小型化できること、バイラテラル制御の際には力のスケールを変更して、繊細な作業や大出力の作業でも対応できるといった利点が存在する。一方で、マスタ側とスレーブ側を電氣的に対応させる必要があるため、エンコーダやポテンショメータ、さらにバイラテラル制御のためのアクチュエータを導入し、さらに電気回路や複雑な制御が介在する必要があるため、機械式に比べて全体が複雑なシステムとなってしまう。

このような特徴を有する電気式マスタ・スレーブ方式操縦桿は、マスタ側とスレーブ側の制御方式によって、さらに2つの方式に分類することができる。マスタ側とスレーブ側の機構を同じくする同構造型、マスタ側とスレーブ側の機構が互いに異なる異構造型である (文献 [27])。

- 同構造型 (図 1.18)
- 異構造型 (図 1.19)

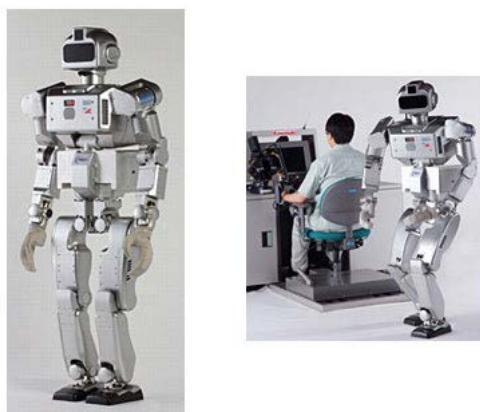


Fig.1.19 HRP-3P and the portable master control system (Ref.[54])

同構造型ではマスタ側・スレーブ側双方を同じ構造にしているため、各関節をそれぞれ対応させて制御することができ、その実装が簡単に可能である。さらに、スレーブ側のロボットの状態はマスタ側の操縦桿の状態から操縦者が直接的に把握でき、遠隔操作によって操縦者の持つ情報が限られていることを考えれば、障害物の回避や特異姿勢の回避といった点で有効である。また、機構・制御設計をスレーブ側のロボットと共通化して、簡素化できるというメリットも存在するが、それ故にロボットの構造が人間の骨格構造と著しく構造が異なる場合には、操縦者の実操作に悪影響が出ることが想定される。同構造型の電気式マスタ・スレーブ方式操縦桿を採用したのものとしては、産業技術総合研究所のHRP-1と遠隔操作システム Super Cockpit (文献 [30]) (図 1.11) や広瀬らの地雷探査ロボット TITAN-IX とその脚を操作するために 4 足歩行ロボット TITAN-VIII の脚を利用した遠隔操作システム (文献 [52]) (図 1.18) が挙げられる。

異構造型は、マスタ側・スレーブ側が異なる構造となるが、マスタ側とスレーブ側の制御を双方の手先の位置と姿勢を対応させて実行し、介在する制御システム内で順運動学や逆運動学を計算して、各関節の制御を実行する。したがって、運動学の計算さえ実行できれば、マスタ側とスレーブ側に機構的な対応関係は必要なくなるため、機構面では比較的自由に設計ができ、マスタ側とスレーブ側の自由度を異なる配置で実現することもできる。すなわち、スレーブ側のロボットの構造からの設計上の制約がないため、機構の小型化が容易であること、さらに操縦桿の運動学が計算できればスレーブ側のロボットには操作対象に制限がなく、様々なロボットの操縦桿として汎用的に使用することが可能となる。さらに、スレーブ側のロボットの構造は無視して、操縦者の骨格や動作に基づいた設計を行うことで、より人間に親和性の高い操縦桿を実現することもできる。しかし、マスタ側・スレーブ側双方の構造が異なるために、常に運動学を計算する必要があるため、全体のシステムが複雑で、計算コストが高くなってしまふ。さらに、スレーブ側のロボットの状態はマスタ側の操縦桿の状態から大まかに予測はできるものの、直接把握することができないため、位置、姿勢情報の伝達や、障害物や特異姿勢の回避のために、ロボットの状態に関する情報の揭示が非常に重要となる。異構造型の電気式マスタ・スレーブ方式

操縦桿の例としては、Kraft TeleRobotics の産業用マニピュレータのための汎用型マスタ mini-master (文献 [53]) や産業技術総合研究所の HRP-3P と可搬型遠隔操作システム (文献 [54]) (図 1.19), tmsuk の T-52 援竜と遠隔操作システム (文献 [55]), 館らの遠隔コミュニケーションロボット TORSO とその遠隔操作システム (文献 [56]), オリンパスの胸部外科用インテリジェント手術支援ロボット (文献 [45]) 等, 現状ではマスタ・スレーブ方式遠隔操縦桿の多くで異構造型が採用されている。

以上をまとめると, 各々の操縦桿の特徴は次の表 1.1 に示す通りとなる。

Table.1.1 Comparison of the remote controller

	Each Switch	Joystick	Master-Slave
Usability	○	○○	○○○
Portability	○○○	○○○	○

ここで, 表 1.1 に記載したユーザビリティと携帯性について以下の通り定義する。

ユーザビリティは一般に様々な意味を含んでいるが, その 1 つとして ISO で定められたインタラクティブシステムに対して使用されるユーザビリティを紹介する (文献 [57])。ここでインタラクティブシステムとは以下の通り定義される。

- ユーザーの仕事の達成をサポートするために, 人間のユーザーからの入力を受信し, 出力を送信する, ハードウェアとソフトウェアの構成要素によって結合されたもの

つまり, 先に述べたロボットやその操縦桿もインタラクティブシステムに十分に該当すると考えられる。そこで本研究では, ユーザビリティを文献 [57] と同様に, 以下と設定する。

- ある製品が, 指定されたユーザーによって, 指定された利用の状況下で, 指定された目標を達成するために用いられる際の, 有効さ, 効率及びユーザーの満足度の度合い

また, この定義中の各用語の定義は以下とする。

- 有効さ
ユーザーが, 指定された目標を達成する上での正確さと完全さ
- 効率
ユーザーが, 目標を達成する際に正確さと完全さに費やした資源
- 満足度
不快さのないこと, 及び製品使用に対しての肯定的な態度

次に携帯性に関しての定義は, 現場までの持ち運びをユーザーが簡単に実行でき, 短い

時間で設営が可能であること，とする。

したがって，これまでに実用化，及び研究されてきたロボットの操縦桿において，一般にユーザビリティと携帯性は相反して決定される性能であると言える。現状では使用する目的によって操縦桿が定まってしまうことになるが，現在，災害現場でロボットが強く求められていることや，今後様々な目的でロボットを導入することが確実な現状を踏まえると，ユーザビリティと携帯性の両立を目指した技術開発を将来を見据えて進めるべきである。

1.3.2 災害対策用ロボットの次世代操縦桿への要求

現在，そして今後数十年，災害対策用ロボットが多数運用されている場所として，国内では原子力発電所が最有力な例として挙げられる。したがって，これからの災害対策用ロボットの開発の基準が，原子力発電所でのロボット運用の知見から設定される可能性は非常に高い。そこで，まず現時点で定められている原子力災害への対応プロセス，特にロボットを用いた対応について紹介する。日本で原子力災害が発生した際には，日本原子力発電の原子力緊急事態支援センターから事故現場にロボットを直接搬入して，偵察（現場調査，空間線量率の測定）及び作業（瓦礫の撤去）の支援を遠隔操作で行うこととなっている（文献 [24]）。現状では，先述した通り，偵察用と作業用と目的ごとにロボットが区別されて運用されている。ここでは要求される内容がより広範囲な作業用のロボットについて紹介する。作業用ロボットは，日本原子力発電が想定する訓練や福島第一原子力発電所で実際に行われている作業内容から，以下の作業に対応することが求められる（文献 [58][59]）。

- 瓦礫除去
- 鍵開け
- ドア開け
- 制御盤のスイッチ操作
- 溝ふき

操縦者はロボットを遠隔操作してこれらの作業に対応することになるが，そのための遠隔操縦桿は，ジョイスティックやゲーム用操縦桿が使われている。しかし，これらの操縦桿を利用した遠隔操作はロボットの状態が認識し難く，速度を抑えた操作となってしまうため（文献 [41]），これらの作業への対応をより柔軟に行える操縦桿が求められる。

また，NEDO の災害対応無人化システム研究開発では，特に原子力災害への対応技術について開発がされているが，その中で今後のロボット遠隔操縦桿の性能について言及している。その性能とは，操縦者の負担軽減・習熟期間の短縮の 2 つで，遠隔作業を現状より効率良く達成することを目指すとして述べている（文献 [24]）。

以上を考慮すると，事故対応を行うロボットの操縦桿は，

- ロボットを簡単に効率良く操作できる

- 一般のドアノブ高さ約 90 cm 程度 (文献 [11]) から床面までの 1m ほどの大きなスケールから, 約 6 cm の溝や鍵の差しこみ穴の受け口約 6 mm, スイッチ約 1.5 cm を対象とした小さなスケールまでのロボット操作を精度良く, 迅速に行える
- 操縦桿を長時間操作できる
- ロボットが周囲環境と接触した状態で作業をすることもあるため, 接触したこと (特に手先) を操縦者が確実に認識できる
- 事故現場で操縦桿の搬入・設営が簡単・迅速にできる

といった性能を発揮することが望まれる。これらを簡単に纏めると, 災害対策用ロボットのための操縦桿は, 搬入時の携帯性と, 遠隔操作時の高いユーザビリティを実現した操縦桿と行うことができる。

現状では, 各軸スイッチ方式とジョイスティック方式を用いた操縦桿の利用がほとんどである (文献 [15])。しかし, 求められる作業は現場によって多様に変化して操縦桿もそれらに対応していく必要性を考えると, ユーザビリティの限界が比較的低い各軸スイッチ方式やジョイスティック方式を採用するよりも, マスタ・スレーブ方式操縦桿の携帯性向上を目指す手法がより現実的な解決手法と考えることができる。

1.4 本研究の目的

本研究の目的は, 災害対策現場において, 災害対策用ロボットを遠隔操作するための, 高いユーザビリティと携帯性を実現するマスタ・スレーブ遠隔操縦桿を実現することである。

そこで本研究では, 所望の性能を有するマスタ・スレーブ操縦桿を実現するために, 従来は高いユーザビリティを実現することだけを考慮して行われていた操縦桿の構成手法に, 携帯性を実現することも考慮した手法を提案し, その提案をもとに試作機を開発して, さらに実験によってその有効性を示すこととする。

1.5 本論文の構成

本論文の構成は, まず次章にて災害対策用ロボットのための次世代遠隔操縦桿について, 要求仕様から設計仕様を設定し, そこから基本的な構成手法の提案を行う。そして第 3 章では, 第 2 章で提案された操縦桿の構成手法をもとに詳細な機構設計, 操縦桿の制御系についての具体的な設計を行って, 試作機を開発していく過程について述べる。そして, 第 4 章では, 開発した操縦桿の性能を検証し, 操縦桿の機能の有効性を示すために行った実験について述べる。最後に, 第 5 章にて, 本論文におけるロボット操縦桿の開発とその検証実験の結果を踏まえての結論と, 今後の課題について述べる。

1.6 まとめ

本章では、まず、世界中の災害とその対応の現状を紹介し、ロボットを用いること、ロボット以外にも遠隔操作技術が重要であることを述べた。遠隔操作技術の要素の一つである遠隔操縦桿は、高いユーザビリティと現場で迅速に展開可能な携帯性を有することが重要であると述べた。そして、これらを実現する新たなマスタ・スレーブ遠隔操縦桿を提案し、試作機開発を行って、実験によって有効性を示すことが本研究の目的であると述べた。

第2章

ロボット遠隔操縦桿 Armrest Joystick の提案

本章では、折りたたみ携帯椅子に装着し、ロボットの先端の位置、姿勢、グリップ開閉の7自由度を操作可能な肘掛け付きバイラテラル制御マスタ・スレーブ遠隔操縦桿 Armrest Joystick を提案する。

2.1 Armrest Joystick の提案

ここでは、前章で述べた災害対策現場でのロボット遠隔操縦桿に求められる要求性能から、詳細な設計仕様を定め、マスタ・スレーブ遠隔操縦桿 Armrest Joystick を提案する。前章でも記述したが、操縦桿への要求仕様を簡単に記述する。

1. ロボットを簡単に効率良く操作できる
2. 1m ほどの大きなスケールから、数 cm の小さなスケールまでのロボット操作を精度良く、迅速に行える
3. 操縦桿を長時間使用しても疲れにくい
4. ロボットが周囲環境と接触したことを操縦者が確実に認識できる
5. 操縦桿の搬入・設営が簡単・迅速にできる

以上の性能を満たす高いユーザビリティと携帯性を実現したロボット遠隔操縦桿が災害対策用ロボットのために求められている。

2.1.1 高いユーザビリティと携帯性を目指した遠隔操縦桿の従来研究

過去にこのような携帯性とユーザビリティを実現しようとした操縦桿が幾つか提案されている。

例えば、文献 [54] では、大型化した操縦桿全体を分割式にして、ユーザビリティと携帯性の両立を目指している。しかし、実際には操縦桿がもともと非常に大きく、ユニット化してもそれ自体が多数必要となってしまう、災害現場に持ち込むことが難しく、その組

立にも時間がとられるため、迅速な対応が難しく、全体としては携帯性という面で問題があった。

他にも、文献 [60][61][62] では、操縦桿をウェアラブルにして操縦者が常に携行することによって携帯性を実現している。しかし、操縦者は操縦桿の質量や操縦桿を動かす際に生じる力の反力を常に体で支える必要があるために、長時間操作する場合に身体的な負担が大きくなったり、操縦者への身体への密着度が高いこともあって、操縦者の運動に合わせた広い操作を実現する機構を設計することが難しいと考えられる。

文献 [63] では操縦桿自体をモバイルプラットフォーム上に搭載して、操縦者がそれに追従して操作する形態を採用している。しかし、モバイルプラットフォームには災害現場を移動できるような高い踏破性は無く、使える範囲が限定されてしまうことや、操縦者が立ち続けることや身体を支える箇所がないことから、長時間操作した場合には疲れやすいと言える。

文献 [64] はバックホウの操縦桿であるが、イス型でアームレストを備えた構造をしているため、長時間使用したとしても操縦者が疲れにくいと考えられる。しかし、アームレストに操縦者やロボットのアームの動きに対して限定的な自由度しか搭載していないため、操縦者の運動は制限された動作となってしまうために、実際の操作できる自由度も非常に限定的となる。さらに、この操縦桿はバックホウ上に搭載されているため、危険な現場でロボットアームと随伴して操作することとなり、仮にバックホウ上から分離しても、携帯性という点でその性能は不十分である。

以上から、ユーザビリティと携帯性を両立させて操縦桿を構成する試みは過去になされているが、実際にはその性能は要求を満たすことはなかった。

2.1.2 Armrest Joystick の提案

本章先頭で論じた要求仕様や過去に提案された操縦桿の知見をもとに、提案する高いユーザビリティと携帯性を実現する操縦桿の基本的な設計方針を設定する。要求仕様で記載した番号に対応して、それぞれの設計指針を述べる。

1. マスタ・スレーブ方式の操縦桿

簡単にロボットの操作を習得して、さらに様々な作業をこなすには、複雑な操作方法の操縦桿は導入が難しい。そこで本研究では、手先だけで操作可能なマスタ・スレーブ方式の操縦桿導入を検討する。マスタ・スレーブ方式の操縦桿を採用することで、ロボットの状態を感覚的に把握し、作業が比較的簡単に行えるようになるが、実際にはロボットの状態を強く意識し過ぎると、情報が限られている遠隔作業の中では、逆に作業対象への意識が削がれることとなる。そこで、スレーブ側のロボットの構造に依存することがなく、ロボットアームの手先の位置と姿勢を入力するだけで操作が可能な異構造型マスタ・スレーブの採用によって、ロボットの簡単で効率良い操作を可能にする。また、空間上で手先の位置の3自由度と姿勢の3自由度を指定さえできれば、一般のロボットアームであれば十分に制御することが可

能であることから (文献 [65][66]), 本操縦桿でも 6 自由度を搭載する. さらに, 操縦者が簡単に各自由度の動作方法を認識できるように, 手首位置で位置指令する 3 自由度位置操作部と手首姿勢で姿勢指令する 3 自由度姿勢操作部に分けて全体を構成する. また, 災害対策用ロボットは現在, ロボットアーム先端に物を掴むための 1 自由度の開閉グリップを多く装備していることを踏まえ, 操縦桿にもこの自由度の操作部を設ける. この自由度は, 操縦者が物を直接掴んだ状況に近い感覚で操作ができるように, 親指と人差指で扱うグリップ操作部で操作を行う.

2. 広い可動範囲

マスタ・スレーブ操縦桿を用いて操縦者が自分の身体の一部を動かして大きな運動から繊細な運動まで行うためには, 操縦桿が身体の動作と大きく異なる運動をするようであれば, 操縦者の動作を妨げることとなり, 実際の操作結果に対しても大きな影響が懸念されると考えられる. そこで, 本研究で提案する操縦桿では, 人間の動作に沿って広範囲な可動域を実現する機構の検討が必要である. また, 人間の動きに沿って十分な可動範囲を持った操縦桿であれば, 細かい操作を行う際にも操縦桿は体の動きにならって動くため, 細かな操作も実現できると考えられる. 6 自由度を持つ位置・姿勢操作部の可動範囲や繊細な動きが必要となるグリップ操作部の可動範囲の設定は, 闇雲に自由度を配置しただけでは性能を確保することが難しい. そこで, 人間の身体器官の配置や動作の特徴を観察し, それを参考に必要な自由度を選択して配置, 設計する.

3. 操縦者の身体補助, 軽い操作力

遠隔操作時に常に立ち続けたり, 操縦桿を常時持ち続け, 動かすことになると, 操縦者が疲れてしまって, 作業効率や性能を低下させることが問題となる. そこで, 操縦者が立ち続けることがなく, さらに操縦者の身体を操縦桿が支持することのできる機構構成, 操縦桿の質量の支持や機構質量の軽量化等で操作力を軽減することの検討が必要である. 具体的には, 操縦者が座って操縦桿を使用できるようにイス型の操縦桿を構成し, さらに操縦者が操作中に動かすこととなる腕部をサポートするアームレストを採用する. ただし, アームレストは操縦者が操縦桿を動かすために必要な腕部の動きをできるだけ妨げないように構成する. また, 現状のマスタ・スレーブ方式の操縦桿は機構を限りなく軽量化することによって, 軽い操作力を実現している (文献 [67]). しかし, 同時に, 軽量化は機構の剛性を失わせることとなり, 操縦桿を動かしても操縦桿が変形して操作が正確にできなくなってしまうことや, 災害現場のような過酷な状況では簡単に壊れてしまう可能性がある. したがって, 過度な軽量化を行わずに, 機構配置を工夫して慣性モーメントを減らしたり, 機構の質量を支持して操縦者が支える質量をできるだけ小さくすることによって軽い操作力を実現する.

4. バイラテラル制御

ロボットアームの遠隔操作時に, 現状ではカメラ映像によって周囲との接触を認識している. しかし, カメラ映像を通して作業をすると, 直接作業した場合は異つ

て、ロボットの状態を把握することが難しく、ロボットが不用意に環境に接触してしまったり、作業対象物を破壊してしまう問題がある。そこで本研究では、ロボット側で計測した力・トルクを操縦者側の操縦桿上で再現し、伝達するバイラテラル制御の実装について検討が必要である。バイラテラル制御として広く用いられているフォース・フィードバックでは、操縦桿を介して接触したことを操縦者に伝達するために、手先では 1.5 N、指先で 25~140 mN 程度の力が必要と言われている(文献 [68][69])。本操縦桿でも接触状態の揭示が重要であることを踏まえて、この値を定常的に出力可能なアクチュエータを操縦桿の全自由度で搭載する。

5. 高い携帯性

災害現場は突発的に様々な場所に現れるため、操縦者側が待機する指揮所を日頃から配備できる場合は非常に稀で、災害が起きるたびに現場近くの安全な場所に指揮所を設置する必要がある。また、現場に指揮所が整っても、操縦桿自体の設置に時間がかかったり、操縦者が使い始めるために多くの機器を体に取り付けたりすることは、一刻も早い対応が重要となる災害現場では大きな問題である。そこで本研究で提案する操縦桿では、現場で操縦者が一人で運搬できる大きさや質量でコンパクトに操縦桿を収め、設営も簡単にでき、さらに操縦桿の使用にあたって、操縦者は身体に一切の機器の着用を要求しない操縦桿構成の検討が必要である。現在、災害対策現場における重量物の運搬では、20 kg 程度が可搬重量の基準として設定されていると考えている。例えば、広く利用されている iRobot 社の PackBot (文献 [40]) は操縦桿も含めて 17.9 kg、産業技術総合研究所の可搬型遠隔制御装置(文献 [54]) では、操縦桿を分割式とし、1つのユニットを 20 kg 以下と設計したと述べている。以上を前提とすれば、今回の操縦桿の重量も 20 kg が可搬できる1つの指標となると考えられる。また、軍事、災害用として緊急性の高い現場で幅広く運用されている PackBot は2分以内で迅速に設営、操作ができるとあり、こちらも携帯性を定める上での1つの基準であると言える。これらの設定を前提として、持ち運びのコンパクトな状態から実際に設置して操作ができるようにするためには、操縦桿全体を軽量に構成し、簡単に展開する折り畳み機構を取り入れて構成する。特に、操縦桿の動作には直接影響することがないと考えているイス部分に、折り畳みの機能を持たせることとする。

以上を纏めると、本論文で提案する操縦桿 Armrest Joystick は、折り畳み携帯イスに装着し、ロボットの位置・姿勢、グリップ開閉の7自由度を操作可能なアームレスト付きバイラテラル制御マスタ・スレーブ遠隔操縦桿である。

2.2 まとめ

本章では、折り畳み携帯イスに装着し、ロボットの位置・姿勢、グリップ開閉の7自由度を操作可能なアームレスト付きバイラテラル制御マスタ・スレーブ遠隔操縦桿 Armrest Joystick を提案した。腕部を支えるアームレストを有し、手首位置を入力とする3自由度

位置操作部, 手首周りの回転角度を入力とする 3 自由度姿勢操作部, 人差指と親指間の把持間隔を入力とする 1 自由度グリップ開閉操作部の 3 部で構成され, 7 自由度全てにおいてフォース・フィードバックが可能で, 可搬性に優れる折り畳み携帯イスに装着可能な操縦桿を提案した. また, この操縦桿は操縦者の疲労低減, 広範な可動範囲と小さな操作力による高いユーザビリティ, 軽量化による高い携帯性が特長であると述べた.

第3章

Armrest Joystick の詳細設計と開発

本章では、提案する Armrest Joystick の設計開発について詳述している。操縦桿の各操作部である、3自由度位置操作部、3自由度姿勢操作部、グリップ開閉操作部に分けて行った詳細な設計について述べる。

3.1 3自由度位置操作部の詳細設計

3.1.1 3自由度位置操作部の機構検討

災害対策ロボットに搭載されるロボットアームは、細かい運動から大きな運動まで幅広い動作が求められる。そこで操縦者がロボットアームを位置指令するにあたって、スレーブ側のロボットアームの持つ大きな可動範囲に対応して、操縦者側でも腕全体を大きく使って操作することが求められる。したがって、その機構は全操縦桿の中で最も大きくなり、必然的にその重量も最も重くなる。このように大きく、重い機構を操縦者が絶えず支持して、動かすことは非常に大きな負担であり、長時間操作を行う際には快適に操作することができない。一方、一般に人間が細かい作業や長時間にわたって作業をする際には、腕や手の一部または全体を自分自身の体や周囲の静止物（机や椅子の肘掛け）にもたれかけさせて支持し、その効果によって腕や手先を長時間でも安定させて作業を続けるといった方法を自然に行っている。しかし、現実には身体を支える机やアームレストは固定されて、動くことがない。したがって、災害対策用ロボットの操縦桿として使用する場合には、腕を固定してしまい、操作範囲を狭めてしまったり、身体を支えるためだけにアームレストや机を導入することは大きな重量増を招くこととなり、携帯性を低下させるといった大きな問題があった。災害対策用ロボットに比べてマスタ・スレーブ方式の操縦桿の研究が進んでいる医療用の操縦桿でこの問題を検証した場合に、Da Vinci や腹腔鏡手術用の操縦桿には概ねアームレストが備えつけられている（文献 [43][45][70]）。しかし、これらの操縦桿におけるアームレストの機能は、操縦者の腕を安定させるために固定する機能に限定されている上、アームレスト自体が動いた場合にも小さな動作に制限されていることも多く、このような状態で手首より先を動かす場合には、その操作にも影響を与えかねず、手先の操作性を低下させることも懸念される。また、これらのアームレストは操縦者の身

体の前部に配置されるため、机の上に配置されて前傾姿勢で使うことになってしまい、長時間使用した際には操縦者への身体的負担が懸念される。さらに、アームレストが机の上に設置されているため、アームレストの可動範囲が机の大きさに強く依存することになる。この問題は、医療用の操縦桿として想定した場合には、机の大きさが小さくても、スレーブのロボットの作業領域は高々身体の一部に収まるため、操作範囲の狭さは問題にならない。しかし、災害対策用ロボットの操縦桿として想定した場合には、その操作範囲の狭小化という問題は非常に大きな問題となる。さらに、机という本来であれば不要の物を追加で現場に運搬しなければいけないこと、等様々な問題が想定される。したがって、今まで提案されてきた机型とは異なる形態でアームレストの使用法を検討する必要がある。

この場合、本来のアームレストという機能の使用法として真っ先に考えられるのは、イス型で操縦者の横にアームレストを設置するという構成である。このイス型という構成に対して、災害対策用ロボットの操縦桿で実現した横小路らの椅子型操縦桿（文献 [55]）も提案されている。しかし、この操縦桿の構造はアームレストが肘部のみを手先の動作の支点として支持していること、肘の支持部がスイッチとして平面上を運動する構造で肘部を安定して支持し続けることができないという問題が考えられる。しかし、この操縦桿におけるアームレストは肘部を不安定に支えているだけでも関わらず、操縦者の腕部の疲労感が軽減するという報告もあり、イス型でアームレストを搭載した操縦桿という構成は十分に検討の余地がある。

また、位置操作部の機構質量を操縦者が支持し続けることは、操作を行う上で操縦者に対して相当な負担となる。しかし、機構質量を軽量化していくだけでは、本来操縦桿に必要な機能に対しても犠牲を払わざるを得ない状況も想定されるため、その質量を別の方法で補償することが有効と考えられる。まず、機構質量を補償する一般的な手法としては、アクチュエータを利用したアクティブな補償方法と、カウンターウェイトやスプリングを利用したパッシブな補償手法の2つが考えられる。前者に関して考察すると、アクチュエータが機構質量を補償するために動作中に常時出力している状況になるため、制御が非常に複雑化する上に、バイラテラル制御も実現する必要がある場合には、要求されるアクチュエータの出力も大幅に増加し、全体の機構質量や機構自体の大型化に繋がって携帯性が損なわれる。したがって、災害対策の現場で用いられる操縦桿としては、機構の小型化や制御の簡素化によって頑健なシステムを容易に構築可能な、パッシブ方式の自重補償機構の採用が望ましい。

パッシブ方式の自重補償機構は、一般に図 3.1 のカウンターウェイトを利用した自重補償機構や、図 3.2 に示すスプリングで構成される自重補償機構が代表的である（文献 [71]）。

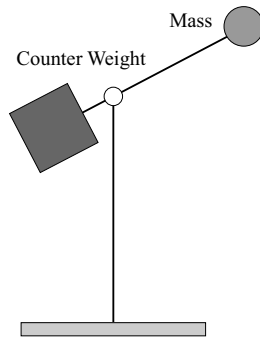


Fig.3.1 Weight compensation mechanism with a counter weight

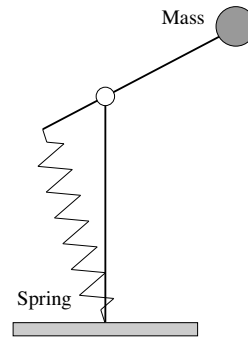


Fig.3.2 Weight compensation mechanism with a spring

カウンターウェイト方式の特徴としては、リンク系の姿勢に依らずに広範囲で自重を補償できるという利点が存在する。一方で、カウンターウェイト自体に操縦桿質量と釣り合うだけの大きな質量が必要で、その質量が全体の質量増加に直結するといったことや、カウンターウェイトのために設置した機構が他の機構と干渉して操作範囲を狭小化すること、さらには軸周りの慣性モーメントが増えてしまうため、急な制動をかけた場合に操作力が増加してしまう、といった問題が生じる。一方で、スプリング方式はカウンターウェイト方式で挙げられた問題点を解決できる代わりに、線形ばねだけで構成する従来の自重補償機構では広範囲に渡って自重を補償するためには機構が複雑になり、広い可動範囲全域で自重を補償する用途には適さない。しかし、この問題に対して、従来のスプリング方式の自重補償機構を改良して、非円形プーリと線形ばねを用いることで広範囲に渡って自重を補償する手法も提案されている（文献 [72]）。非円形プーリとは図 3.3 のように、スプリングが巻きつくプーリの半径を姿勢によって変化させて、非線形なモーメントを発生させる機構である。

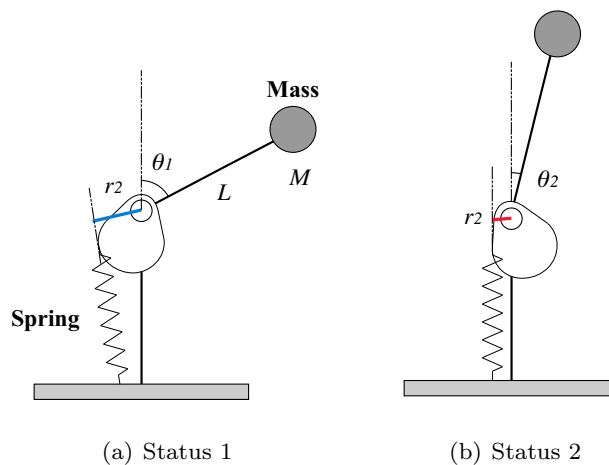


Fig.3.3 Principle of the weight compensation mechanism with the non-circular pulley

これらを全て考慮した場合、カウンターウェイト方式の問題点を解決でき、さらに線形

ばねだけでは難しい広範囲に渡る自重補償を実現可能な、非円形プーリと線形ばねによる自重補償機構の採用が有効であると考え、広範囲で操縦桿質量を支持できる機構をコンパクトに実現することとした。

これらの基本的な設計指針を参考に、イス型で構成されて、サイドには操縦者の腕を支えるアームレストを備え、操縦桿の質量を機構的に支持できる自重補償機構を搭載した位置指令操縦桿を提案し、軽快な操作によって動作し、操縦者への疲労も少なく、広い操作範囲を確保することとした。

3.1.2 3自由度位置操作部のための腕部の動作検証

次に、アームレストを備える操縦桿の機構構成について考える。3自由度位置操作部の自由度構成を検討するため、手先を3方向前後、左右、上下の動きに合わせて移動した際の、人間の腕全体の動作に必要な関節の動作について検証する（図 3.4）。

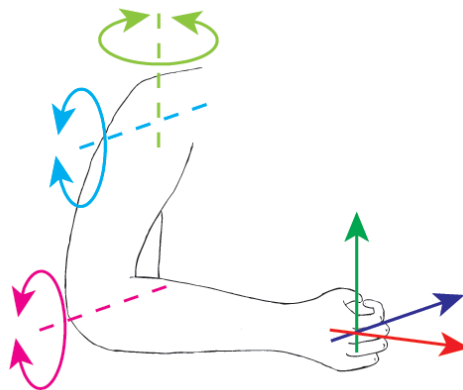


Fig.3.4 Movement analysis of a shoulder and elbow

その結果、手先の前後運動には、まず肩の屈曲・伸展、次に肘の屈曲・伸展が大きな可動範囲が必要となる。手先の左右運動は、肩の水平内転・水平外転、次に肘の屈曲・伸展、手先の上下運動は肘の屈曲・伸展、次に肩の屈曲・伸展が大きな可動範囲を提供して、所定の動作を実現している。したがって、3自由度位置操作部の自由度構成を考える場合にも、これらの肩、肘で機能している自由度の特徴を取り入れることで、操縦者が操作のし易い機構を実現できると考えられる。

次に、操縦桿の機構を実現する機械要素を検討すると、主たる機械要素として回転機構や直進機構を用いた構成が考えられる。まず、直進機構に関しての検討を行う。直進機構は、位置操作という点から考察すると、XYZの空間上の3つの位置座標を簡単に計測することができ、操縦桿の機構として適用しやすいと考えられる。一方で、実際に直進機構（リニアガイド、ボールねじ）を用いた設計を検討すると、必要な可動範囲に応じて各要素にストローク長が必要とされ、結果として機構自体が非常に大きく、重くなってしまうという問題がある。さらに、現状では災害現場のような過酷な環境では防塵・防水といっ

た機能も求められることを踏まえると、直進機構はそういった対応が難しく、実際に利用するには問題が多く残っている。加えて、人間の動作は、各関節が回転自由度によって構成されているため、本来は直進機構と操縦者の親和性が高くないという問題もある。以上の挙げた要因から考えても、操縦者の体の構成に対して柔軟に対応可能で、実装面でも十分にシンプルかつ頑健な回転機構を用いて、操縦機構を構成することが望ましい。

位置操作部に必要な 3 つの回転自由度の配置方法を検討する。先ほど述べた、人間の手先を 3 方向に動かした場合の各関節の動作の考察も参考にすると、それら 3 自由度の配置方法は次の図 3.5 の 3 種類が存在する。

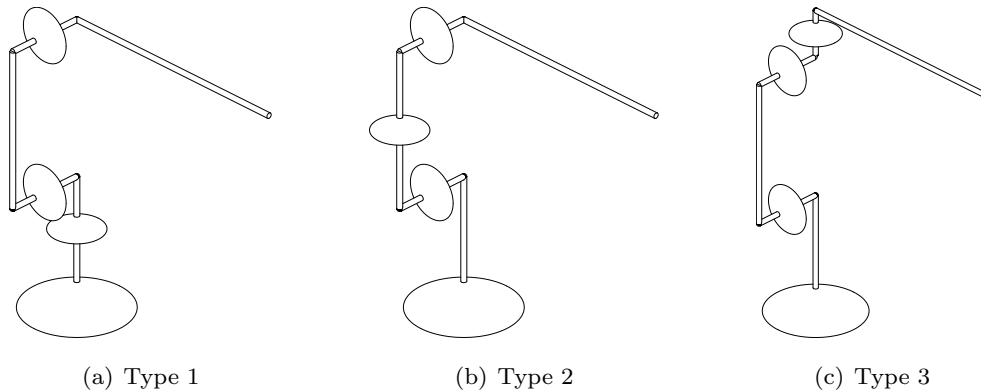


Fig.3.5 Axis arrangement for the 3DOF position controller

各自由度配置について、人間の腕部の動作特性を参考にして検討を行う。先に記述したそれぞれの方向の運動に対して、手先の前後運動と上下運動は共に、肩と肘の屈曲・伸展運動が大きく寄与している。したがって、これらの方向の運動を位置操作部で実現するに際して、相互に隣接して配置して機構に収めることによって、この運動に対して円滑な動作を実現していくことが有効と考えられる。そのような自由度配置を採用しているのは、図 3.5(a), 3.5(c) である。両機構で異なっている自由度は、鉛直方向の回転自由度の配置となっている。ここで、再び人間の肩と肘の動作を顧みると、アームレストに最も近い自由度は肘の回転自由度で、一方で肩の水平内転・水平外転はアームレストから遠い位置に配置されている。さらに、より手先に近い方が関節を駆動する筋肉の出力も小さいこと、アームレストに接近している筋肉の方がより操作力や機構における諸影響に対して敏感に反応すると考えられる。したがって、実際の自由度配置にもそれらの影響を考慮して、肘関節の回転自由度をアームレストに最も近く配置した図 3.5(a) の自由度配置が有効であると考えられる。以上の考察を下に、3 自由度位置操作部の基本的な自由度配置は、図 3.5(a) の順番で実現することとした。

このように、自由度配置の順番について決定した上で、先端の 2 自由度は回転自由度が同平面内にあり、その機構実現の手法としてシリアルリンク機構 (図 3.6) に加えて、パラレルリンク機構 (図 3.7) を利用することも可能である。

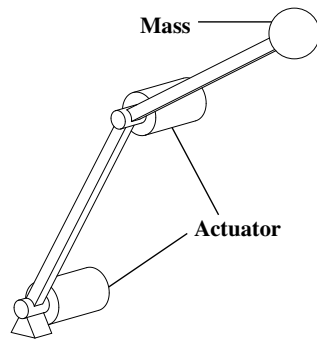


Fig.3.6 Serial link structure

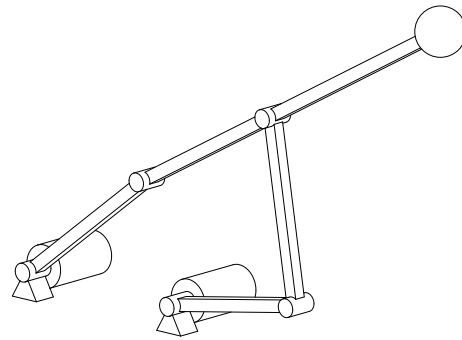


Fig.3.7 Parallel link structure

まず、シリアルリンク機構は、機構自体を簡単に構成・設計することができ、軸の可動範囲は軸周りに広い可動範囲を実現できることが利点となる。しかし、バイラテラル制御を実現することを考慮した場合に、各関節にそれぞれ重いアクチュエータを配置する必要があり、先端部リンクの機構質量が増加して操作力が大きくなってしまう。

一方の平行リンク機構は、先端のリンクを根本付近の追加したリンク機構によって駆動できるため、シリアルリンク機構では各関節に必要であったアクチュエータを取り除くことができ、先端部のリンク機構を軽量化して、操作力を低く抑えることができる。短所としては、平行リンク機構は構成するリンク同士の干渉によって、十分な可動範囲が得られない可能性が存在することである。しかし、人間が腕を動かすことができる領域や各関節の可動範囲は大まかに決まっているため、シリアルリンク機構の特徴である制限のない可動範囲はむしろ不要であると言える。そこで、平行リンク機構でも機構設計から可動範囲について十分に検討できれば、3自由度位置操作部の構成要素としては十分に機能すると考えられる。以上の考察から、本機構は、平行リンク機構を採用して、操作時の軽快な操作力を確保することとした。

3.1.3 3 自由度位置操作部の第一次試作の機構設計

3 自由度位置操作部における肘掛け型と自重補償機構のコンセプトの有効性を検証するために、バイラテラル制御用アクチュエータを省略して、図 3.8 に示す 3 自由度位置操作部の第一次試作を製作した。



Fig.3.8 Prototype of the 3DOF position controller

3 自由度位置操作部の第一次試作の性能諸元を表 3.1 に示す。

Weight (with Chair)	3.25 kg
Size (without Chair) (W × L × H)	375 × 105 × 510 mm
Size (with Chair) (W × L × H)	385 × 430 × 645 mm
Workrange	X : 150 mm, Yaw : 150°, Z : 300 mm

Table.3.1 Specification of the prototype for the 3 Position Controller

屋外用折り畳み椅子をベースにその後部脚に3自由度位置操作部の第一次試作が固定されている。軽量の位置操作部が折りたたみ椅子に固定されているため、全体としても非常に軽量に収まっている。全体が軽量で収まっているにも関わらず、操縦者がベースとなる折りたたみ椅子に着座して使用するため、操縦桿を動かした際の反力を操縦者の体重で確実に受けることができるという特徴も有する。さらに、運搬時にコンパクトに収納できることを目指して、操縦桿の2自由度4節パラレルリンク機構のジョイントには簡単に取り外し可能な機構を備えているため、図3.9のとおり、椅子と同様に操縦桿も折り畳んで運ぶことができる。

3自由度位置操作部の第一次試作の機構は、まず折り畳み椅子の後脚部に固定され、鉛直軸（後脚部）周りの1自由度と、その先端に配置されたパラレルリンク機構の2自由度で構成し、パラレルリンク機構の最上部に配置されたリンクがアームレストの役目を担っている。このアームレストは、アームレストがパラレルリンク機構の一部を構成していることで、操縦者の腕の動きを制限することなく、操縦者の横に広がる広範囲な領域を移動することができる。さらに、位置操作部先端には、図3.10に示す3次元造形で製作した3自由度ジョイスティックを模した簡易の姿勢操縦桿とグリッパ操縦桿を備えている。



Fig.3.9 Mobile form of the prototype for the 3DOF position controller

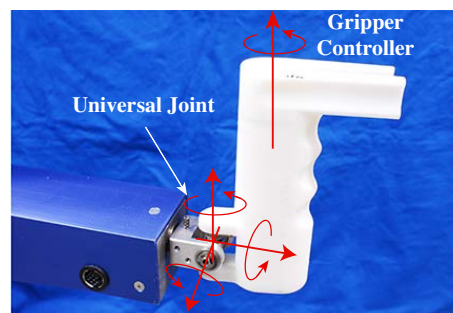


Fig.3.10 Wrist and gripper controller of the prototype for the 3DOF position controller

機構内部には、図3.11に示すワイヤとスプリングを用いた自重補償機構が収められている。3自由度位置操作部の第一次試作は折りたたみ型のアームレストのコンセプトを検証するために製作したことから、自重補償機構は、先節で述べた広範囲で補償可能な機構ではなく、力補償の機能を限定し、軽量且つ簡易的に設計可能な自重補償機構となっている。

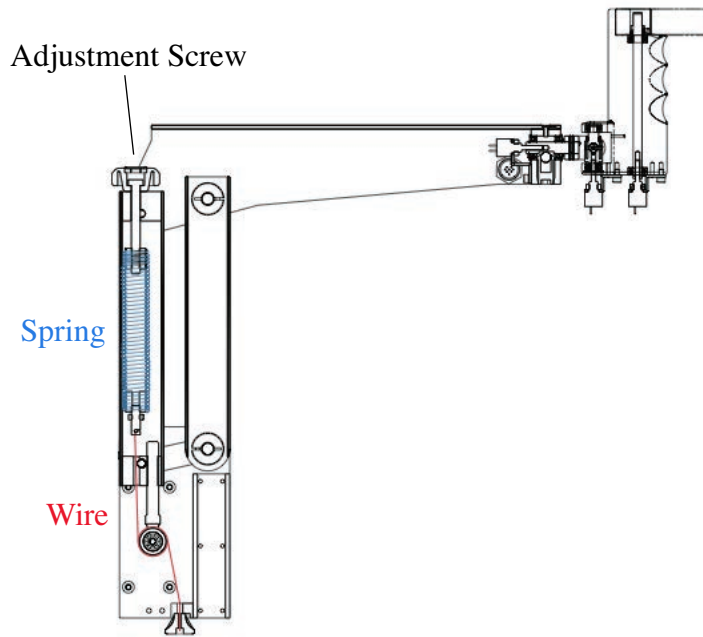


Fig.3.11 Weight compensation mechanism of the prototype for the 3DOF position controller

以下に、3 自由度位置操作部の第一次試作の自重補償機構について行った設計の詳細を述べる。

3 自由度位置操作部の第一次試作の自重補償機構設計

3 自由度位置操作部の第一次試作に搭載している自重補償機構の設計に関して述べる。この操縦桿上で各軸周りに発生するトルク τ を計算するために、図 3.12 と 3 自由度位置操作部の第一次試作をモデル化する。各リンクのリンク長を L_1, L_2 、各リンクの重心とリンク端の距離を L_{M1}, L_{M2}, L_{M3} 、各リンクのリンク質量を M_1, M_2, M_3 、各リンクの基準との角度を θ_1, θ_2 とする。

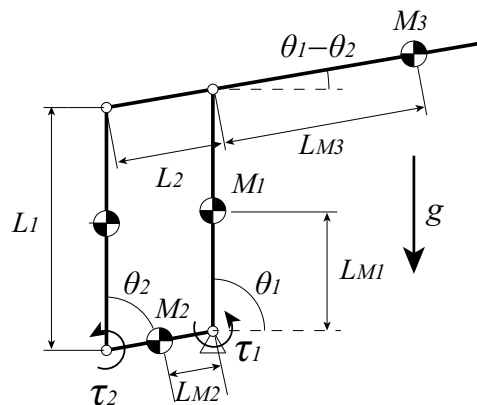


Fig.3.12 Calculation model of the prototype for the 3DOF position controller

したがって、トルク τ は、3次元CADを利用して求めた機構の重心位置に関する情報も利用すると、ヤコビ行列 \mathbf{J} 、重心に働く力 \mathbf{F} を用いて、次の通り表現できる。

$$\boldsymbol{\tau} = \Sigma \mathbf{J}^T \mathbf{F} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \tau_1 = & -(2M_2L_{M1} + M_3L_1)g\cos\theta_1 \\ & + (M_2L_{M2} + M_1L_2 - M_3L_{M3})g\cos(\theta_1 - \theta_2) \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\tau_2 = -(M_2L_{M2} + M_1L_2 - M_3L_{M3})g\cos(\theta_1 - \theta_2) \quad (3.3)$$

リンク長 : $L_1 = 170$ [mm], $L_2 = 46$ [mm]

リンク重心までの長さ : $L_{M1} = 82$ [mm], $L_{M2} = 22$ [mm], $L_{M3} = 240$ [mm]

リンク質量 : $M_1 = 99$ [g], $M_2 = 50$ [g], $M_3 = 935$ [g]

以上から、機構質量由来のモーメントの可動範囲内での分布は、次の図 3.13, 3.14 に示す通りとなる。

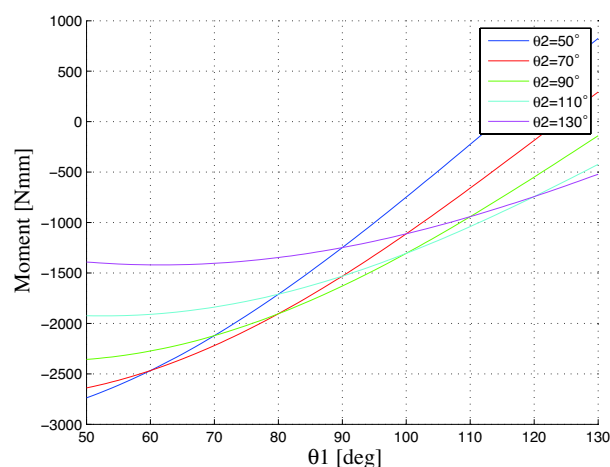
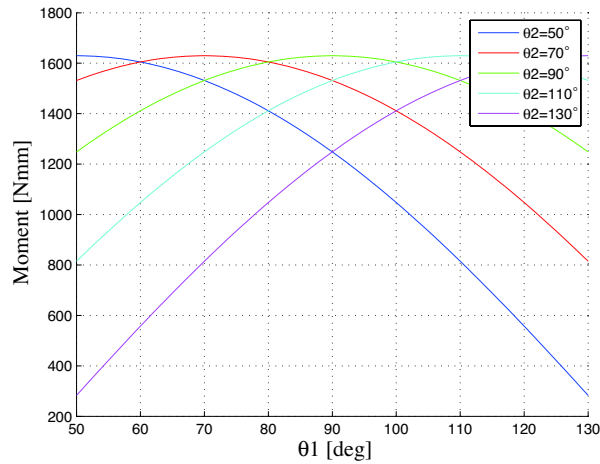


Fig.3.13 Torque profile (τ_1)

Fig.3.14 Torque profile (τ_2)

これらのモーメントの分布結果から、モーメントの分布が非常に複雑であることがわかる。今回はコンセプトの検証用の試作モデルとして製作することを目的としているため、今回はより単純化して、図 3.15 のように、最も質量の大きい先端リンクに対して、地面に対してのリンク姿勢に応じて質量由来モーメントのみを線形ばねで補償する簡単な機構を導入することとした。

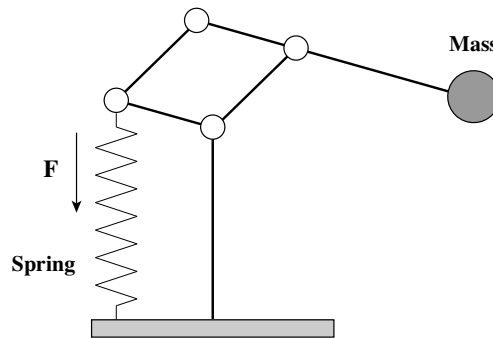


Fig.3.15 Mechanism of the weight compensation mechanism for the prototype of the 3DOF position controller

この際に、先端リンクのリンク質量 M_3 が、リンク長が L_1, L_{M3} のリンクが交わるジョイント周りに発生するモーメントは、次の式で表せる。

$$\tau_{12} = -M_3 L_{M3} g \cos(\theta_1 - \theta_2) \quad (3.4)$$

したがって、このモーメント τ_{12} と釣り合うばねの張力は次のとおりである。

$$F = -\frac{\tau_{12}}{L_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)} \quad (3.5)$$

$$= \frac{M_3 L_{M3} g}{L_2} \quad (3.6)$$

したがって、スプリングに必要となる張力は、38.64 N となる。以上の復元力を出力可能な自重補償機構のスプリングとして、MISUMI の引張りばね AWF18-150 (初張力：36 N, バネ定数：1.36 N/mm) を選び、プリテンションを掛けて使用することとした。

3 自由度位置操作部の第一次試作の評価

この3自由度位置操作部の第一次試作に対して、簡単な評価を行った。

まず、携帯性・設置性は、操縦桿全体が非常に軽量であること、構成が非常にシンプルであることもあり、簡単に持ち運びでき、イスを広げただけで設置が完了し、30秒以内に簡単に行うことができた。また、実際に操縦桿を扱ったところ、イス型で肘掛け型操縦桿という構造に対して、アームレストがリンク系として操縦者と一緒に動くことができるため、操縦者の位置の3自由度を動かす際に違和感なく操作することができた。さらに、自重補償機構は、自重補償機構で機構質量が軽減されていること、操縦桿が非常に軽量にできていることもあり、腕全体が疲れることなく軽快に動かすことができた。しかし、可動範囲内でスプリングの張力が変化してしまうため、自重補償の大きさが増加した位置にくると、スプリングの張力が影響して、その結果手先に大きな操作力がかかって違和感を抱く結果となった。これに対しては、3自由度位置操作部の第一次試作では自重補償機構を簡易的に搭載したことが原因として考えられるため、最終的に製作する操縦桿において広範囲に対して力補償可能な自重補償機構を搭載することが有効であることが想定される。以上の結果から、イス型肘掛け型操縦桿というコンセプト、さらに自重補償機構が操縦者に与える影響について簡単に確認した。

3.1.4 3 自由度位置操作部の第二次試作の機構設計

最初の設計指針と第一次試作で行った検証を下にして，図 3.16 に示す 3 自由度位置操作部の第二次試作を製作した．また，3 自由度姿勢操作部の性能諸元を表 3.2 に示す．

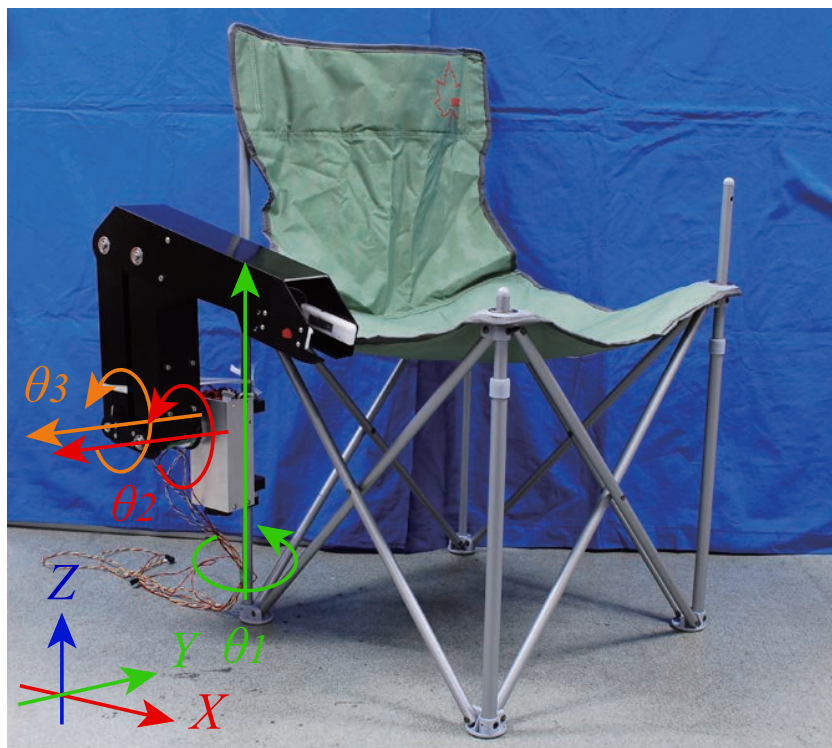


Fig.3.16 Position Controller of the Armrest Joystick

Table.3.2 Specification of the 3DOF position controller

Weight (with Chair)	7.6 kg
Size (without Chair) (W × L × H)	359 × 186 × 407 mm
Size (with Chair) (W × L × H)	647 × 545 × 842 mm
Workrange	X : 270 mm, Yaw : 150°, Z : 500 mm
Actuator Power	11 W (Each Axis)
Gear Reduction Ratio	$\theta_1 : 111/1, \theta_2 : 246/1, \theta_3 : 128/1$
Encoder Count	2048 count/round
Feedback Force (at tip)	3 N (Each direction)

また，その内部機構を図 3.17 に示す．

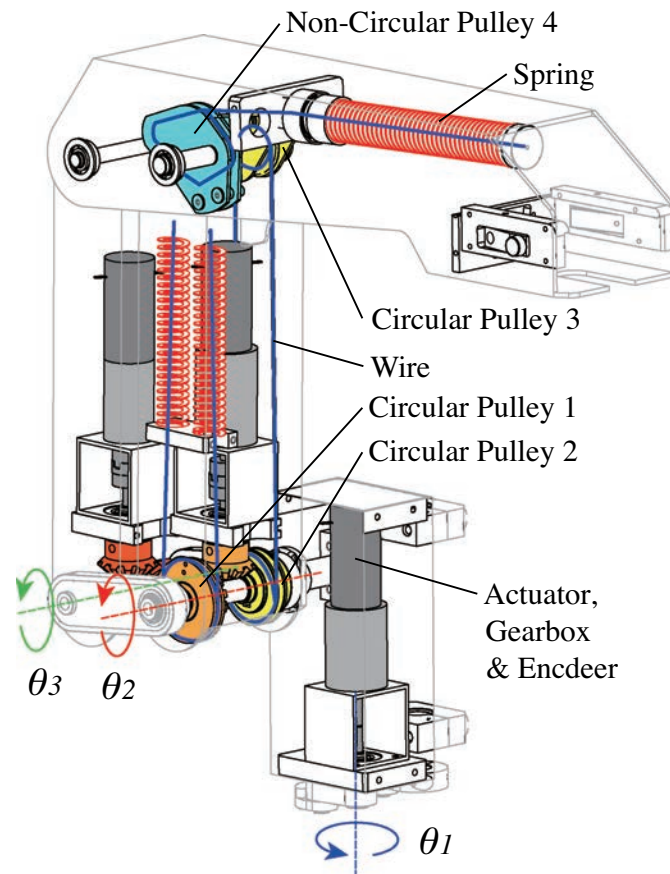


Fig.3.17 Mechanism of the 3DOF position controller

図 3.16 に示す通り，屋外用折り畳み椅子をベースにその後部脚に 3 自由度位置操作部が固定されている。屋外用折り畳み椅子（Logos 製：マルセルチェア）は質量 2.2 kg で，運搬時には全体を簡単かつコンパクトに収納することができる。また，イス型を採用しているため，操縦者は操作中でも長時間立ち続ける必要がなく，さらに操縦者の体重がフォース・フィードバックの反力の補償を担うことができるため，折り畳み椅子自体を軽量化できるという特徴も有する。3 自由度位置操作部は第一次試作の機構構成を踏襲し，折り畳み椅子の後脚部に固定され，鉛直軸（後脚部）周りの 1 自由度とその先端の平行リンクの 2 自由度で構成し，平行リンクの最上部に配置されたリンクがアームレストの役目を担っている。このアームレストは，アームレストが平行リンクの一部を構成していることで，操縦者の腕の動きを制限することなく，操縦者の横に配置される広範囲な領域を移動することができる（図 3.18，3.19，3.20）。



Fig.3.18 Workrange along X direction on the position controller

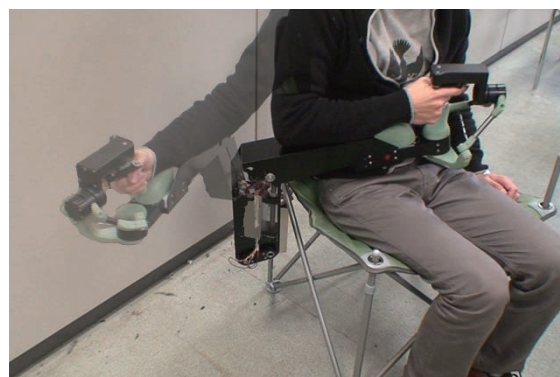


Fig.3.19 Workrange around Yaw axis on the position controller

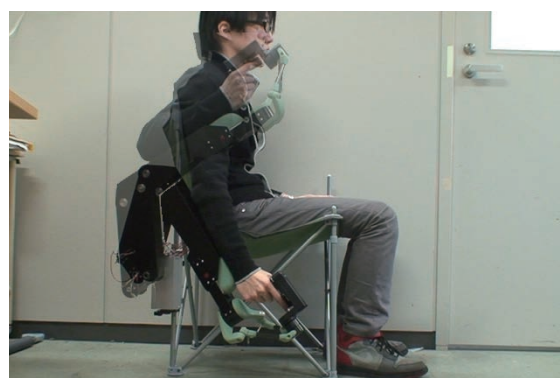


Fig.3.20 Workrange along Z direction on the position controller

また、パラレルリンク機構を使用しているため、関節角度を計測するために必要なエンコーダやバイラテラル制御に用いるアクチュエータを各関節毎に配置する必要が無く、パラレルリンク機構の根元付近に集中して配置することができるため、先端部の機構で質量が大きくなる問題を解決し、軽量に構成できる。バイラテラル制御に用いるアクチュ

エータは、減速機付き DC モータ (Maxon 製 : A-max 26 + GP32A (θ_1, θ_2) & GP26B (θ_3)) を用い、各モータに搭載されているエンコーダから各軸の関節角度を計測する。また、機構内部には線形ばねとワイヤ・プーリを利用した自重補償機構が収められている。円形プーリ 1, 2 はパラレルリンク機構と独立して土台の機構に固定されているため、機構の姿勢に依らずに地面に対する姿勢を常に保つことができる。円形プーリ 3 は、円形プーリ 2 とワイヤで接続されていてパラレルリンクとして機能するため、このプーリに対して同軸に配置され、また固定されている非円形プーリ 4 も、機構の姿勢に依らずに、地面に対する姿勢が常に一定に保たれている。プーリ形状は、非円形プーリ 4 のみ特別に非円形として、広範囲で機構質量を補償している。

以下に自重補償機構について行った設計の詳細を述べる。

3 自由度位置操作部の第二次試作の自重補償機構設計

自重補償機構を実現するプーリを設計するにあたって、まずは操縦桿質量によって発生する軸周りのモーメントを計算する。

この軸周りのモーメントを計算するにあたって、3 自由度位置操作部のモデル化を行う。モーメントを計算するためには各操作機構の質量の情報が必要になるため、実際には位置操作部と後述の姿勢操作部の設計がある程度進展した段階で、プーリの設計を行った。モデル化した状態が図 3.21 であり、各リンク質量 M_i のリンク長を L_i 、リンク重心とリンク端の距離を L_{Mi} と設定した ($i = 1 \sim 4$)。この際のリンク質量 M_4 は、既に姿勢操作部の質量を含み、リンク重心 L_{M4} も姿勢操作部の質量を考慮した上で設定している。

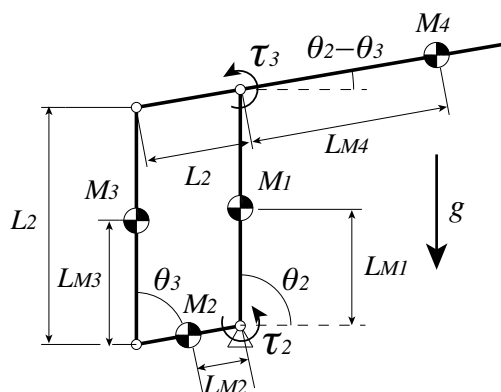


Fig.3.21 Calculation model of the Armrest Joystick

ここで、各重心に対するヤコビ行列 \mathbf{J} と重心にかかる重力による力 \mathbf{F} を考慮して、以下の数式を用いて、各関節にかかるモーメント $\boldsymbol{\tau}$ を計算することができる。

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\Sigma} \mathbf{J}^T \mathbf{F} \quad (3.7)$$

この式をもとに各関節周りのモーメントは次のとおり計算できる。

$$\tau_2 = -(L_{M1}M_1 + L_{M3}M_3 + L_1M_4)g\cos\theta_2 \quad (3.8)$$

$$\tau_3 = (L_{M2}M_2 + L_2M_3 - L_{M4}M_4)g\cos(\theta_2 - \theta_3) \quad (3.9)$$

リンク長 : $L_1 = 235$ [mm], $L_2 = 63.29$ [mm]

リンク重心までの長さ : $L_{M1} = 118$ [mm], $L_{M2} = 47$ [mm],

$L_{M3} = 105$ [mm], $L_{M4} = 293$ [mm]

リンク質量 : $M_1 = 1008$ [g], $M_2 = 230$ [g], $M_3 = 740$ [g], $M_4 = 2250$ [g]

以上の数式に記述されている通り, τ_2 , τ_3 は, それぞれリンク質量 M_1 のリンク, リンク質量 M_4 のリンクの地面から見た姿勢 θ_2 と $\theta_2 - \theta_3$ に応じて, それぞれ独立に軸周りのモーメントが生じることがわかる. したがって, これらの補償モーメントを発生させる自重補償機構の設計に際しても, その設計はそれぞれの軸毎に独立して行うことが可能である. 以下に, それぞれの軸周りのモーメントに応じた自重補償機構のためのプーリ設計について述べていく.

まず, 軸周りモーメント τ_2 の自重補償機構のプーリ設計について述べる. τ_2 の可動範囲 $\theta_2 = 50 \sim 130^\circ$ でのトルクの変化の様子をグラフに描くと, 図 3.22 のようになる.

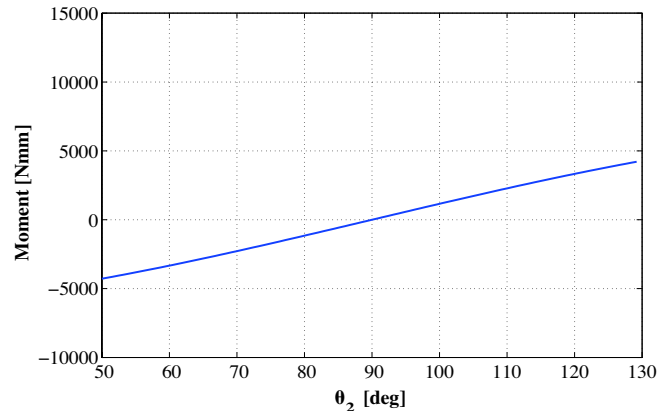


Fig.3.22 Gravity moment (τ_2)

このグラフのモーメントの変化の様子は, 非常に線形に近い. 軸周りのモーメント全体を線形補間して一次近似した直線と比較した場合に, 可動範囲端部で, 近似曲線の値に比べて実際のモーメントの値が 3.2 % 小さくなっているに過ぎない. したがって, この軸周りのモーメントは線形近似で描いた近似曲線を用いて, 線形な自重補償, つまり円形プーリを利用した自重補償機構で対応して, 製造コストの低下や簡易に組立, 調整することの利点を優先することとした.

この円形プーリに求められる補償モーメントが, 可動範囲内で正負が変化していることを踏まえて, 2つのばねを使用して, 図 3.23 のように自重補償機構を設計する.

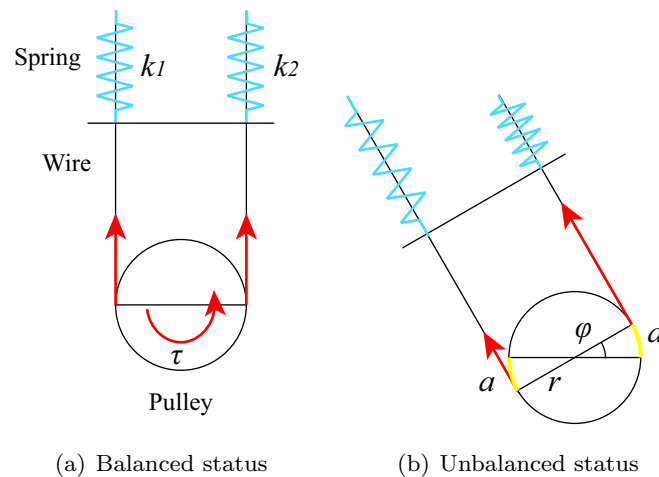


Fig.3.23 Mechanism of the weight compensation mechanism with the circular pulley

プーリ半径を r 、各バネのばね定数を k_1, k_2 とし、リンクの初期姿勢からの角度を ϕ 、プーリに巻き付くワイヤ長さを a 、自重補償機構によって得られる補償モーメントを τ と設定する。この設定のもとで、ばねの初期縮みが初期姿勢 $\phi = 0$ で共通であったとすれば、補償モーメント τ は以下のとおりである。

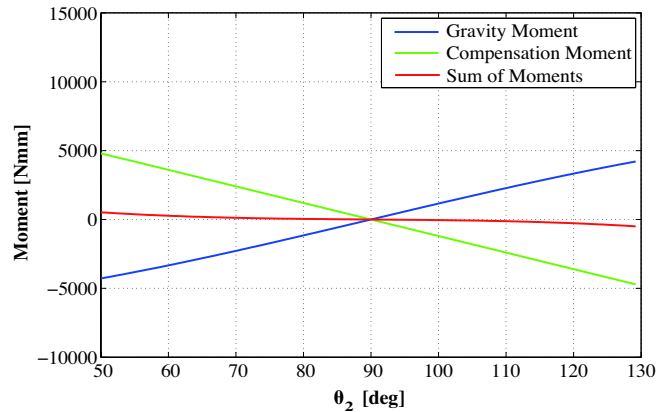
$$\tau = r(k_1 a + k_2 a) \quad (3.10)$$

$$= (k_1 + k_2)r^2 \phi \quad (3.11)$$

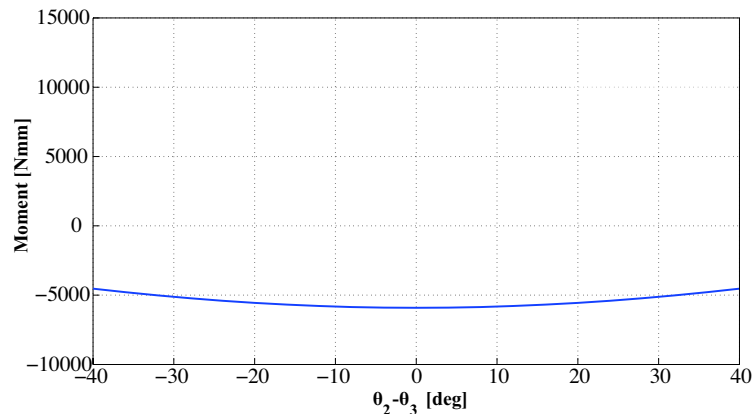
さらに、今回の機構では機構の質量由来のモーメントが $\theta_2 = 0$ で点対称な軌跡を描くことから、簡単のため使用するばねを共通のもの ($k = k_1 = k_2$) を利用するとその数式は以下のとおりである。

$$\tau = 2kr^2 \phi \quad (3.12)$$

この数式を下に設計で導出したプーリ半径 $r = 20 \text{ mm}$ を用いて、市販の圧縮バネに対して、ばね半径や許容たわみの情報から、機構の質量由来のモーメントと比較して最適なばねを選択する。今回は、MISUMI 製のコイルスプリング SWL-16-100（外径：16 mm，全長：100 mm，許容たわみ率：40%，ばね定数：8.6 N/mm）を選択した。その選択によってこの軸周りの正味のモーメントは、図 3.24 となる。領域全体で完全にモーメントを補償することはできないが、その影響は最大で機構質量由来モーメントの 11.2% ほど大きく軽減することができる。この値は、プーリ半径 r を小さくすることでその影響をより小さくできるが、その影響によってワイヤとプーリがスリップして自重補償機構の機能が変化することを防ぎ、より安定的に自重補償機構を機能させることを考慮して、設計値のプーリ半径を使用することとした。

Fig.3.24 Moment trajectory (τ_2)

次に、軸周りモーメント τ_3 の自重補償機構のプリー設計について述べる。 τ_3 の可動範囲 $\theta_2 - \theta_3 = -40 \sim 40^\circ$ でのトルクの変化の様子をグラフに描くと、図 3.25 となる。

Fig.3.25 Gravity Moment (τ_3)

このグラフから、軸周りのモーメントの変化の様子は、先ほどの軸周りモーメント τ_2 とは異なり、非線形の軌跡を描いている。したがって、先ほどと同様の円形プリーを使用した手法では十分な自重補償が得られないため、今回は非円形プリーの導入を検討する。

ここで非円形プリーの設計は、文献 [73] にも記述されている通り、解析的手法と数値計算的手法の2つから設計が可能である。解析的手法は、機構設計によって常に機構質量が変更することや、実際に設計を行っても解析の結果得られた特性を満たす線形ばねが存在せず、機構を実現できない可能性があるといった実用面から、実際の設計を進める上で利用が難しい。したがって、今回の非円形プリーの設計にあたっては、実際の設計条件を考慮しながら設計可能な数値計算的手法を導入して行う。

その手順を簡単に以下に示す。まず、図 3.26 に示す通り、自重補償機構のスプリング側とプリー側におけるワイヤの端部の軌跡を設定する。

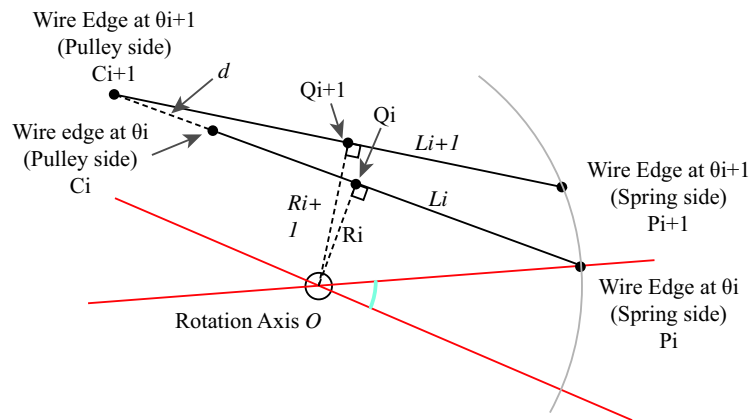


Fig.3.26 Procedure to derive the non-circular pulley

1. スプリング側とプーリ側の初期姿勢におけるワイヤ端部の位置 P_0, C_0 , リンクの初期角度 θ_0 を設定する.
2. 使用予定のバネ定数 k , 自然長 x_0 , 初張力 F_0 を定める.
3. バネが最大たわみの状態 x_{max} にある状態から設計する.
4. リンクの角度を $\Delta\theta$ だけ変化させ、接線 L_{i+1} に対して、その延長線上に次のワイヤ端部 C_{i+1} を設定する. この時、ワイヤのプーリへの巻きつき長さの変化は $C_i P_i - C_{i+1} P_{i+1}$ となる.
5. 巻きつき長さの変化に応じて、ばね張力 F_{i+1} を求める.
6. 所望のトルクに対して、ばね張力 F_{i+1} とワイヤと中心距離 R_{i+1} から求められる軸周りのトルクを計算して、比較する.
7. 比較した結果が同等のトルクであれば設定したワイヤ端部 C_{i+1} を定め、同等でなければワイヤ端部を延長線上でずらして再計算、再度比較を行う.
8. 4~7の各手順を可動範囲全てを走査するまで繰り返し続ける.

以上の手順を踏まえて設計を行う. 今回は予め行った大まかな仕様計算から、次の4つのMISUMI製の圧縮バネをから選定して、最適なばねを選択することとした. 各バネの特性を表3.3に示す.

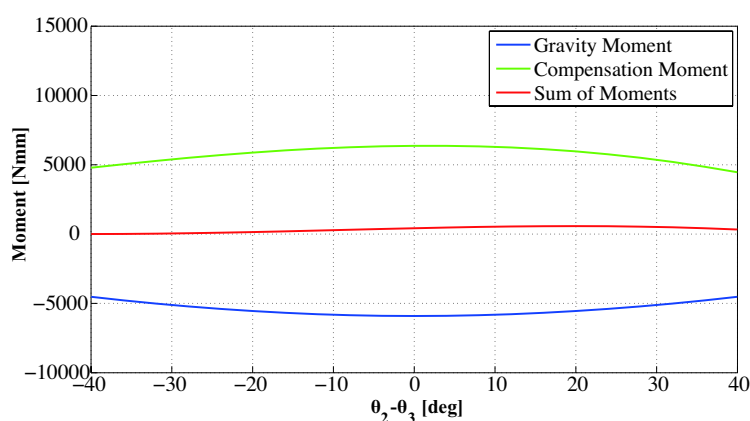
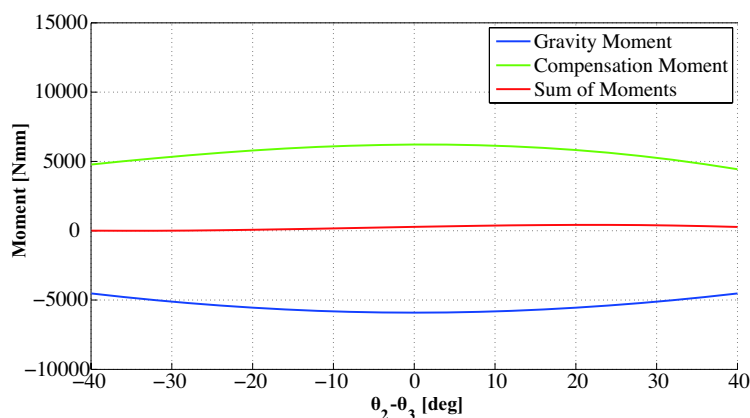
Table.3.3 Specification of the springs for the weight compensation mechanism

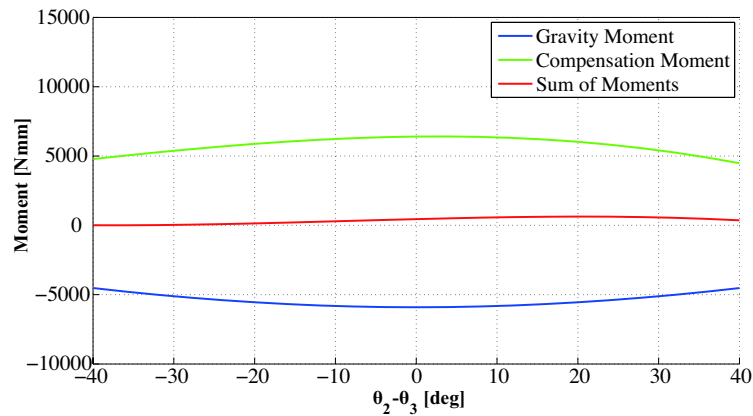
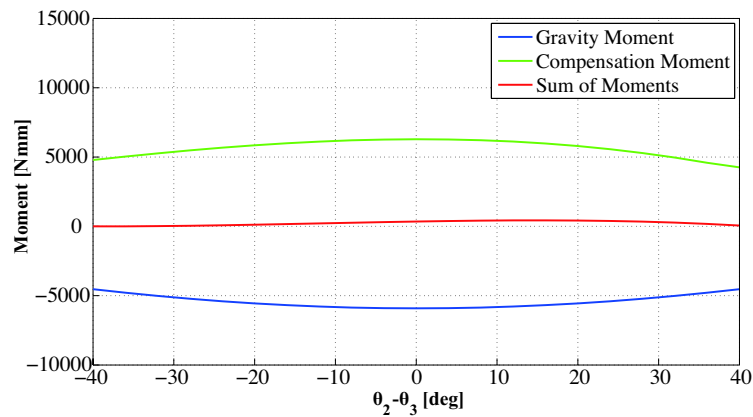
	Spring Rate [N/mm]	Default Length [mm]	Minimum Length [mm]
SWL20 - 125	10.6	125	67.5
SWL20 - 150	8.8	150	71
SWL22 - 125	13.1	125	67.5
SWL22 - 150	11	150	71

バネの選択に当たっては、機構の配置によって決められる自然長の最長：150 mm が考慮されている。同時に、プーリの形状は、ジョイントとリンク同時の位置関係からプーリ半径が 8~46 mm 以内という制約の下で計算を行った。各ばねに対して、初期半径を 1 mm ずつ変化させて計算を行い、自重補償トルクが最も機構質量由来のモーメントに近い値を示した時を代表して表 3.4 に示す。また、その場合の補償トルクの変化をそれぞれ図 3.27~3.30 に示す。

Table.3.4 Selection table of the springs for the weight compensation mechanism

	Minimum radius [mm]	Maximum radius [mm]	Minimum spring length [mm]	Maximum spring length [mm]
SWL20 - 125	10	30.1	82	111
SWL20 - 150	11	31.2	103	134
SWL22 - 125	9	27.9	86	113
SWL22 - 150	10	43.5	108	138

Fig.3.27 Moment trajectory (τ_3) (Spring : SWL20 - 125)Fig.3.28 Moment trajectory (τ_3) (Spring : SWL20 - 150)

Fig.3.29 Moment trajectory (τ_3) (Spring : SWL22 - 125)Fig.3.30 Moment trajectory (τ_3) (Spring : SWL22 - 150)

いずれのばねを使用した設計も、機構質量由来のモーメントに対して非線形の補償を可動範囲内で実施できていることが確認できる。この結果に対して、正味の軸周りモーメントから機構質量由来のモーメントに対する割合を可動範囲全域で計算し、その値を平均した結果を表 3.5 に示す。

Table.3.5 Compensation rate of the selected springs for the weight compensation mechanism

	Average Rate [%]
SWL20 - 125	5.89
SWL20 - 150	4.12
SWL22 - 125	6.34
SWL22 - 150	3.96

その結果, SWL-22-150 を利用した場合が最も精度良く, 幅広い可動範囲内で補償できていることがわかる. この計算結果を下に, 非円形プーリのスプリングとして SWL-22-150 を用いることとし, その機構を実現するための図 3.31 に示す非円形プーリを製作した.

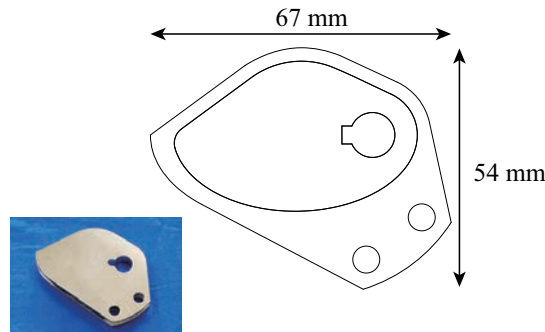


Fig.3.31 Non-Circular Pulley for the 3DOF position controller on the Armrest Joystick

以上の設計手法を下に, 円形プーリ・非円形プーリを用いた自重保障機構を導入し, 広範囲の関節角度において機構質量を補償可能なコンパクトな機構を実現した.

3.2 3 自由度姿勢操作部の詳細設計

3.2.1 3 自由度姿勢操作部の機構検討

3 自由度姿勢操作部は, 3 自由度位置操作部の先端に取り付けられ, 操縦者の手首で操作を実行する機構となる. したがって, 機構に搭載される 3 自由度は, それぞれの自由度が人間の手首の大きな可動範囲に対応して, 操作に違和感を与えないだけの十分な可動範囲を実現することが求められる.

また, 先行研究から, 手首操作部の基本的な構造は, バイラテラル制御の際に手先で行う力とトルクの認識を確実に実行するといった理由から, 機構の回転中心と操縦者の把持部の中心付近を一致させたジンバル機構が有効であるとわかっている (文献 [54]). このようなジンバル機構を利用した手先の操縦桿は現在まで様々に考案されてきた. 特に, ジンバル機構として大型のベアリングやリニアガイド等を利用して, 手首に必要な大きな可動範囲を実現している操縦桿が報告されている (文献 [74] [75]). しかし, 人間の手首は本来全周回転する構造ではなく, 上記の機構ほど広い可動範囲を必要としないことや, 全周回転する機構要素は総じて大きく, 重いこと, バイラテラル制御時のアクチュエータの配置・駆動, 防塵・防水の機能を維持することの難しさから, 別の機構を採用することが望ましい. 特に, 今回は災害現場の厳しい環境下で使用する操縦桿であることから, 構造自体がシンプルな機構を採用したものが最適である. したがって, このような特徴をもつジンバル機構を実現するためには, シリアルリンク機構とパラレルリンク機構といったリンク機構を利用する手法が最も有効であると考えられる (文献 [55] [76]).

それぞれのリンク機構の特徴としては、位置操作部の設計の中でも議論した通りである。シリアルリンク機構は、機構設計法が直接的で設計から制御まで非常にシンプルに実行できる反面で、手首による操作によって可動するリンク上にジョイント角度を計測するエンコーダやバイラテラル制御に用いるアクチュエータを各軸ごとに配置することが不可欠である。これらによってリンク重量が増加して、操作力が上昇し、操縦者により大きな力の出力が常に求められて、操作性が落ちる問題が考えられる。また、シリアルリンク機構自体は剛性が小さく、素早い動作を実行する場合にパラレルリンク機構に比べてその速度が遅くなるため、バイラテラル制御でこれらが不利な問題と挙げられる。

一方、パラレルリンク機構では、アクチュエータを非可動部分に配置することが可能なため、リンク重量が軽減できて操作力の軽減が実現し易い。しかし、パラレルリンク機構では一般に構成するリンク相互の干渉の問題が起き易く、設計によっては手首周りに必要な可動範囲が実現できずに、狭小化するという問題がある。バイラテラル制御では、リンク系の剛性が上がると共に、早い動作もシリアルリンク機構に比べて実現し易いため、人間の早い反応速度に対応した操縦桿を構成する上では大きな利点である。

3自由度姿勢操作部としては、まずは大きな可動範囲を有することが非常に重要な問題であるが、実際にはシリアルリンク機構のように無限に回転できるほどの可動範囲は、人間の関節可動範囲が有限であるため本来必要ない。したがって、可動範囲は人間の手首の可動範囲程度は十分に確保しつつも、操作力の低減やバイラテラル制御での利点を多く持つパラレルリンク機構を利用する方が、メリットが大きいと考えられる。

これらの基本的な設計指針を参考に、人間の手首部における運動・感覚特性を考慮したパラレルリンク機構と、その性能を実現するためのバイラテラル制御用アクチュエータの配置法を提案し、手首操作機構に求められる広い動作領域の確保と、軽快で自然な操作性を確保することとした。

3.2.2 3 自由度姿勢操作部の機構設計

設計指針を下に製作した 3 自由度姿勢操作部を図 3.32 に示す. また, 3 自由度姿勢操作部の性能諸元を表 3.6 に示す.

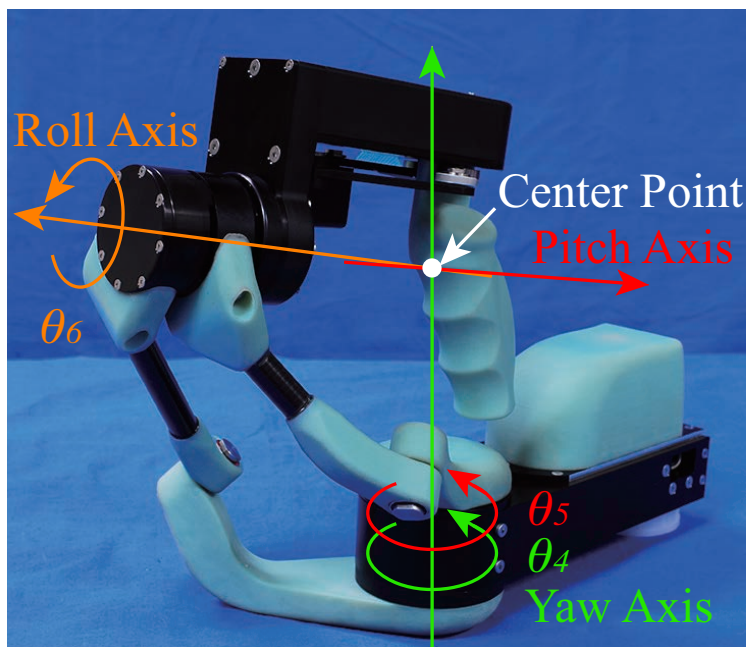


Fig.3.32 Overview of the 3DOF posture controller

Table.3.6 Specification of the 3DOF posture controller

Weight	1543 g
Size (W×L×H)	310 × 155 × 211 mm
Workrange	Roll : -112~111°, Pitch : -55~20°, Yaw : -155~150°
Actuator Power	θ_4, θ_5 : 6 W, θ_6 : 12 W
Gear Reduction Ratio	θ_4, θ_5 : 19/1, θ_6 : 17/1
Hallsensor Count	6 count/round
Peak Torque	0.02 Nm (Each Axis)

また、その内部機構を図 3.33 に示す。

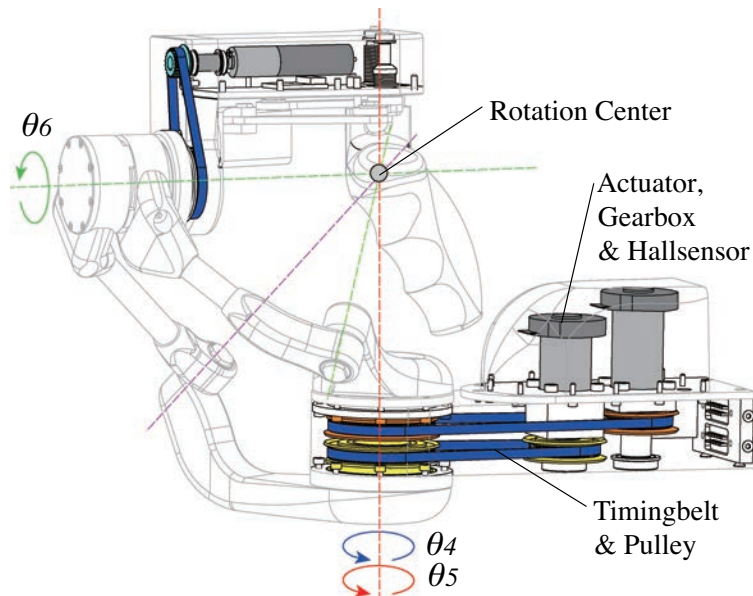


Fig.3.33 Mechanism of the 3DOF posture controller

3自由度姿勢操作部は、2自由度の球面4節平行リンク機構とその先端に配置された回転1自由度機構で構成され、全回転軸が把持部の中心付近で1点に交差する機構を実現した。球面4節平行リンク機構では2つのフォース・フィードバック用モータはリンク上ではなく、台座部に配置されていて、さらにその構造はCFRPパイプや3次元造形部材で軽量の機構を実現した。また、平行リンク機構は台座部の回転軸を同軸に配置しているため、通常は機構の干渉によって台座部周りに大きな可動範囲を得ることが難しい自由度であるにもかかわらず、十分に広い可動範囲を確保している。さらに、先端の1自由度は平行リンク機構と独立して配置することで、平行リンク機構からの干渉を受けずに大きな可動範囲を実現した。以上の広い可動範囲を有する2つの回転軸を、手首の動作の中でも大きな可動範囲が必要になるRoll軸、Yaw軸に配置し、手首を大きく動かす事が可能な可動範囲を確保することとした(図3.34, 3.35, 3.36)アクチュエータは減速機付きブラシレスモータ(Maxon製: EC motor EC32 flat + GP22A (θ_4 & θ_5) EC motor EC13 + GP13A (θ_6))を使用し、各モータに搭載されているホールセンサを用いて関節角度を計測する。

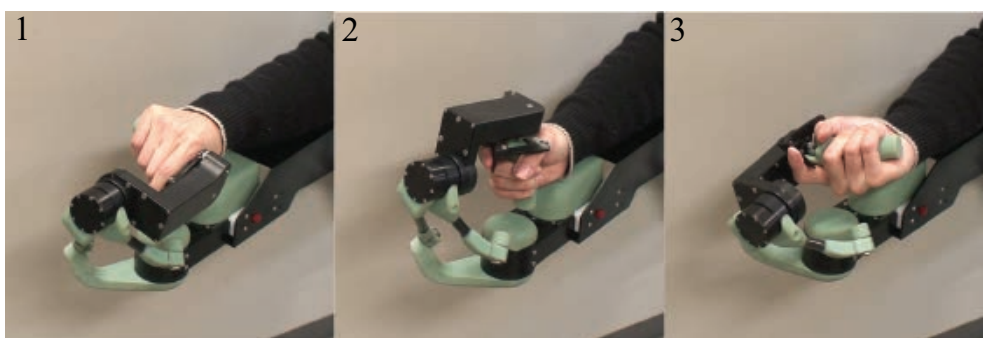


Fig.3.34 Workrange around Roll axis on the posture controller



Fig.3.35 Workrange around Pitch axis on the posture controller

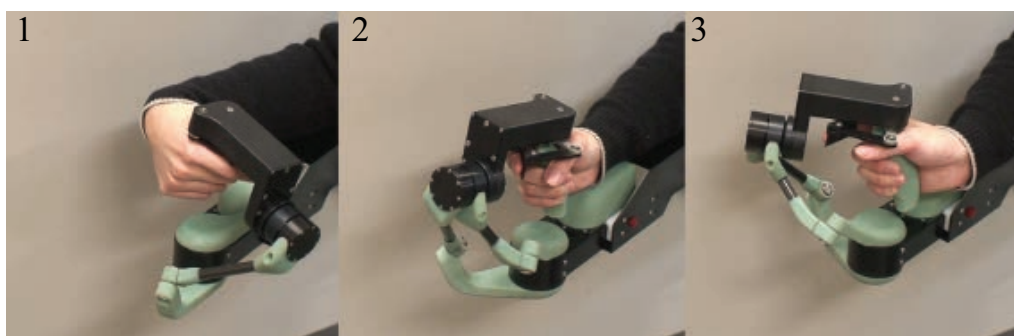


Fig.3.36 Workrange around Yaw axis on the posture controller

以下に機構構成について行った検証の詳細を述べる。

3 自由度姿勢操作部の機構構成の検証

3 自由度姿勢操作部中に 2 自由度パラレルリンク機構を採用したことの有効性を確認するため、機構の質量に対して同じ自由度構成を持ったシリアルリンク機構のリンク質量と比較を行った。実際にはシリアルリンク機構は製作していないため、パラレルリンク機構のリンク質量から推定した。まずは、比較を行うにあたって、姿勢操作部の Pitch 軸、

Yaw 軸周りの運動を実現するシリアルリンク機構を図 3.37、パラレルリンク機構の Pitch 軸，Yaw 軸周りの運動に関する機構のみを全て選択して図 3.38 とモデル化する。

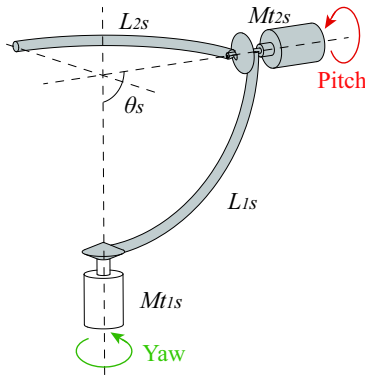


Fig.3.37 Serial linkage model for the posture controller

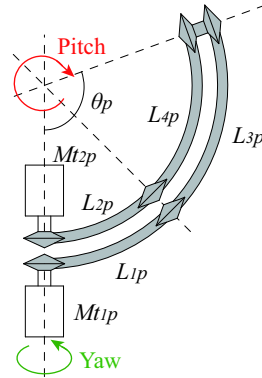


Fig.3.38 Pararell linkage model for the posture controller

比較を行う際の仮定として、両機構が設計仕様であるバイラテラル制御時の各軸周りの出力トルク 0.02 Nm を満足し、さらに機構の回転中心からリンクに至るまでの距離が等しい、という条件を設定する。

まずは、シリアルリンク機構に用いるアクチュエータを選定する。ここで、シリアルリンク機構のアクチュエータ M_{t1s} , M_{t2s} を、パラレルリンク機構と同じ Maxon 製 EC32 flat を用い、減速機は GP22A の減速比 3.8 : 1 とする。このアクチュエータはモータ定数 9.5 Nmm/A であり、最も効率の良い時の出力トルクは 0.023 Nm となる。シリアルリンク機構では、各軸ごとに設置されるそれぞれのアクチュエータが独立に出力トルクを発生できることから、選択したアクチュエータは仮定で設定したバイラテラル制御の仕様を満たす。

次に、シリアルリンク機構のリンク質量の設定は、既に製作したパラレルリンク機構のリンク質量を参考として設定した。まず、製作したパラレルリンク機構の各リンク質量を計測すると、それぞれ $L_{1p} : 118 \text{ g}$, $L_{2p} : 80 \text{ g}$, $L_{3p} : 44.4 \text{ g}$, $L_{4p} : 82.7 \text{ g}$ である。また、パラレルリンク機構全体が伸展した際に端部の対偶間の角度は最大 110° である。これらの情報を下に、シリアルリンク機構をパラレルリンク機構と同等の部材で製作すると仮定し、さらにリンク長は端部の対偶間角度を 90° と設定して、シリアルリンク機構ではリンク質量が等分布すると仮定して推定を行った。ここで、パラレルリンク機構とシリアルリンク機構で共通して存在するジョイント部の質量 M_{jsp} は同様に配置するが、シリアルリンク機構では不要となるジョイント部の質量 M_{jp} は含まないこととし、代わりとしてシリアルリンク上に配置されるアクチュエータ M_{t2s} の質量 M_{mt2s} を加えて推定した。以上から、パラレルリンク機構の質量 M_p から、シリアルリンク機構の質量 M_s を求める式は以下の通りとなる。

$$M_s = (M_p - M_{jsp} - M_{jp}) \frac{\theta_s}{\theta_p} + M_{jsp} + M_{mt2s} \quad (3.13)$$

以上の推定を下に行った両リンク機構の稼動部の質量の合計は、パラレルリンク機構質量が $M_p = 325.1$ g, シリアルリンク機構質量 $M_p = 346.2$ g となる。実際には、シリアルリンク機構ではモータが可動部の最外周部に位置する等で全体的に回転中心から遠い距離に質量が分布することとなり、慣性モーメントを計算した場合には、パラレルリンク機構よりもその値は大きくなって、この質量の差以上に操作力が増大すると考えられる。したがって、この推定からも判明した通り、Pitch 軸、Yaw 軸の動作を生成する機構の質量は、パラレルリンク機構を採用することで、シリアルリンク機構を使用した場合のリンク質量に比べて実際に軽減できることを確認した。

機構質量の推定値の比較からパラレルリンク機構の有用性が示されたものの、実際にパラレルリンク機構を使用するに際しては、特異姿勢の回避が設計や制御の面で課題となる。特に 3 自由度姿勢操作部のパラレルリンク機構では、台座部の回転軸を同軸に配置した球面リンク機構を採用していることもあり、特異姿勢を回避することは非常に大きな課題となる。

本パラレルリンク機構 (図 3.39 は同自由度モデル) でも、図 3.40 に示す 4 つの特異姿勢が考えられるが、その全てを機構設計により回避している。

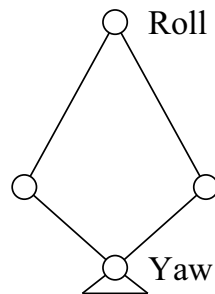


Fig.3.39 2DOF parallel linkage model

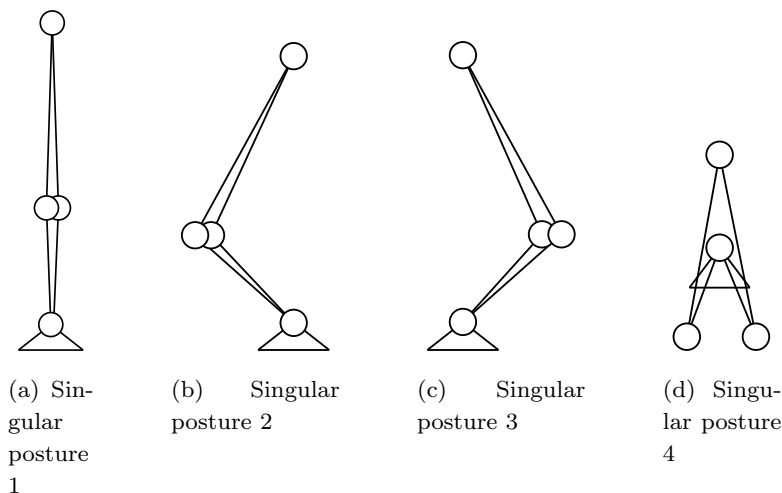


Fig.3.40 Singular posture of the 3DOF posture controller

設計法の1つ目は、Roll 軸先端の回転ジョイント部に無限回転を防ぎ、リンク同士が重なることを防ぐ機械式ストッパを設けることである (図 3.41)。

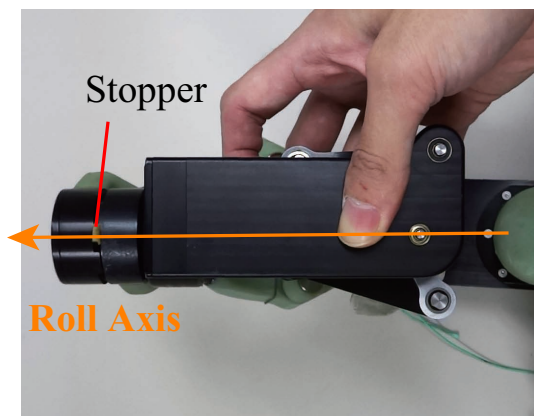


Fig.3.41 Mechanical stopper at roll axis

2つ目は、図 3.38 中の回転中心に対して、外側に配置した2本のリンクの合計長 ($L_{1p} + L_{3p}$) と、内側に配置した2本のリンクの合計長 ($L_{2p} + L_{4p}$) を等しく設定することである。ここで、この場合のリンク長とは、実際のリンクの対偶間の距離のことではなく、本パラレルリンク機構が球面リンク機構を用いていることもあり、機構解析では球殻状の2次元平面上で簡単に扱えることを利用して、各リンクにおける回転対偶間の角度のことを表している (文献 [77])。したがって、本機構における各リンクのリンク長は $L_{1p} = L_{2p}$, $L_{3p} = L_{4p}$ と等しく設定されており、全体のリンクの様子は図 3.40(a), 3.40(b), 3.40(c), 3.40(d) とモデル化が可能である。この設定を下に、各特異姿勢 (図上では表記上の都合から、実際にリンクが重なった状態はわかりづらいため、特異姿勢に近い姿勢を示す) の回避方法の詳細を述べる。

図 3.40(a) の特異姿勢 1 はリンク全体が伸びきった姿勢となっている。この際には、通常のリンク姿勢からこの姿勢に変化する途中で Roll 軸に設けた機械式ストッパが機能して、図中に描いた姿勢の通りに、リンク同士が重なる前にリンクの動作が止まって、特異姿勢には至ることはない。本機構構成とは異なり、左と右のリンクの合計リンク長が異なる場合 ($L_{1p} + L_{3p} \neq L_{2p} + L_{4p}$) には、他のジョイント部に新たにストッパを設けたり、解析や制御面での検討が必要になるが、左右の合計リンク長を等しくしたこと ($L_{1p} + L_{3p} = L_{2p} + L_{4p}$) でそれらの影響を一切考慮すること無く、簡単に設計・制御が可能となる。

次に図 3.40(b) の特異姿勢 2 では、左右のリンク長の合計が等しいため、通常のリンク姿勢 (図 3.39) からこの特異姿勢に至るには特異姿勢 1 を経由する必要があるが、前述の Roll 軸上のストッパによって特異姿勢 1 の姿勢が除外されるため、この特異姿勢に関しても検討の必要がない。本機構とは構成が異なり、左と右のリンクの合計リンク長が異なる場合には、他のジョイント上に新たにストッパを設け、解析と制御面での新たな検討が必要になるが、本機構は左右で合計リンク長が等しくしたため、その影響を除外すること

ができる。

次の図 3.40(c) では、先の特異姿勢 2 とは左右線対象の機構構成となっていることから、特異姿勢 2 で挙げた手法によって、特異姿勢を回避することが可能である。

最後に、特異姿勢 4 では、Roll 軸と Yaw 軸のジョイントが一致しているが、実際には Roll 軸、Yaw 軸周りのジョイント機構が相互に干渉することになるため、特別な機構は用いずとも特異姿勢を回避することができる。この特異姿勢 4 は、左右の合計リンク長を等しく構成しない場合でも同様で、機構同士の干渉から回避することができる。

以上の 2 つの手法によって特異姿勢は予め回避されることがわかっているため、制御では特異姿勢の検討は全く必要ない。また、リンク長設計に際して、左右で合計リンク長が等しい ($L_{1p} + L_{3p} = L_{2p} + L_{4p}$) という条件の下では、特異姿勢を全く検討せずに、設計仕様として設定した可動範囲や出力トルク、さらに使用するアクチュエータの条件等を考慮するだけで、非常に簡単にリンク長を設定することができる。

3.3 グリッパ開閉操作部の詳細設計

3.3.1 グリッパ開閉操作部の機構検討

グリッパ開閉操作部は、3 自由度姿勢操作部の把持部付近に設けられ、操縦者の指先で操作する機構となる。グリッパを用いた操作ではスレーブ側ロボットのグリッパ機構が環境と密に接触することとなるため、グリッパ開閉操作部は操縦者の指先の動作を正確に計測し、スレーブ側のグリッパの状況を鮮明に伝達可能な機構を採用することが望ましいと考えている。しかし、一般に公表されているマスタ・スレーブ方式操縦桿におけるグリッパ開閉操作部は、他の操作部に比べて、操作のし易さを追求したものが提案されておらず、従来のボタンやレバー機構、シンプルな 1 軸の機構を利用したものが多い (文献 [78] [79])。例えば、シンプルな 1 自由度の回転機構や直動機構を用いた場合には、指の開閉動作が複雑な動きであることに比べて機構の動作が非常に単純で、動作を一致させることが難しく、リンク機構と指先同士が滑って操作に違和感が生じて操作ミスを誘発したり、バイラテラル制御で力を還した場合にも正確に力を伝達できないことが懸念される (図 3.42)。

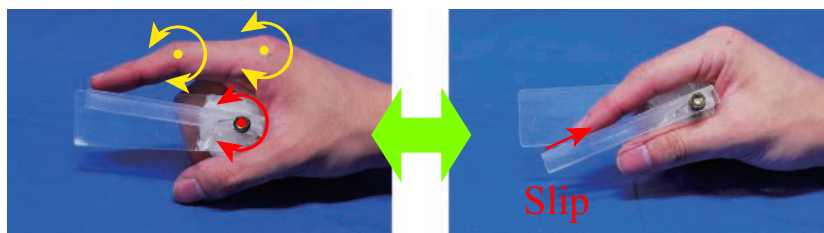


Fig.3.42 Problem of a finger controller with a simple mechanism

災害対策の現場で、操作への悪影響が出てしまうことは大きな問題となるため、複雑な

指先の動きに対しても十分に追従することができる機構を採用することが望ましい。

指の運動に倣う操縦桿の従来の研究では、複雑な機構を用いて指の動作に追従し、操縦桿の装着にも時間がかかるものが多い（文献 [80] [81]）。しかし、実用的にはシンプルで装着も簡単、且つ指の運動に円滑に追従する機構を用いた操縦桿が必要である。そこで、指先の開閉動作における動作解析を行い、その結果を用いて最低限必要な動作を選択し、その結果を下にシンプルな操作機構を提案する。さらに、回転機構を利用して、機構の運動における機械的な抵抗の影響が小さくなるように構成し、指先の複雑な動作にも円滑に追従可能な機構を設計することとした。

3.3.2 グリッパ開閉操作部のための指先の動作検証

グリッパ開閉操作部を検討するため、様々な把持動作の中でも最もシンプルで、かつ機構も構成し易いと考えられる親指と人差し指だけを利用した摘み動作における各関節の可動範囲を調べた。動作の計測には、親指と人差し指を脱力させた状態で指の腹部を約 8 cm の間隔に開いた状態から摘み動作を行い、その動作をカメラで撮影した（図 3.43）。カメラで撮影した映像を参考に、各関節の可動範囲を計測した。計測の対象には、成人男性 8 名を選び、それぞれの被験者が計 10 回の摘み動作を実行した。

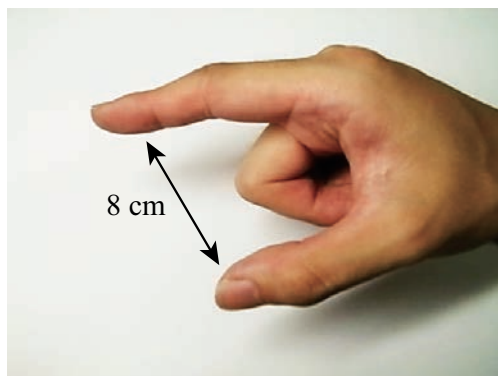


Fig.3.43 Measurement of the fingers' joints workrange at the pinching motion

各関節の可動角度の全被験者における平均値を表 3.7 に示す。

Table.3.7 Finger's joint workrange

Thumb		Index Finger		
IP	MP	DIP	PIP	MP
6.3°	16.6°	17.8°	27.6°	27.2°

親指と人差し指の摘み動作では、人差し指の PIP, MP 関節が特に大きな可動範囲を必要として、次いで親指の MP 関節と人差し指の DIP 関節が大きく運動していることがわ

かる。この結果からも分かる通り、指先は非常に複雑な運動をしていることから、グリップ開閉操作部でも先述したシンプルな1自由度機構では実現が難しい。全関節の動作を機構で再現する場合には、全部で5自由度必要となるが、指先部分に搭載することとなるために非常に小さく複雑な機構となる。さらに、指先では個々の長さが操縦者によってそれぞれ異なっていることから、全ての動作を厳密に再現した場合に、操縦者によって非常に操作が難しい機構になる可能性がある。そこで、ある程度機構構成を簡略化して、最小限の動きだけを再現することで、これらの違いを無視し、指先への影響が少ない機構を構成することとした。その場合、指先の各運動の中でも、可動範囲の特に大きい人差し指のPIP、MP関節の動作が重要であると考えられる。また、親指の動作は、人差し指のPIP、MP関節の動作に比べて動作範囲が小さいこと、操縦棒全体の固定部となる把持部を操縦者に対してしっかりと固定するために、指先全体で把持部を保持することを考慮して、リンク機構は導入せずに把持部に固定することとした。以上の考察を下に、グリップ開閉操作部として、指先の動作解析の結果から、人差し指の2自由度に簡素化した開閉操作機構を採用し、指先の摘み動作に自然と追従可能な機構を提案する。

3.3.3 グリップ開閉操作部の機構設計

3自由度姿勢操作部のRoll軸機構上に、人差し指の摘み動作に追従する2節の外骨格型リンクと、そのリンク先端に接続される2節リンクの2つのリンク機構で構成されるグリップ開閉操作部を製作した。外骨格型リンク機構は、摘み動作中に人差し指の運動に追従するため、大きな可動範囲を必要とするMP関節とPIP関節上に機構の回転軸が一致するように機構を構成した(図3.44)。

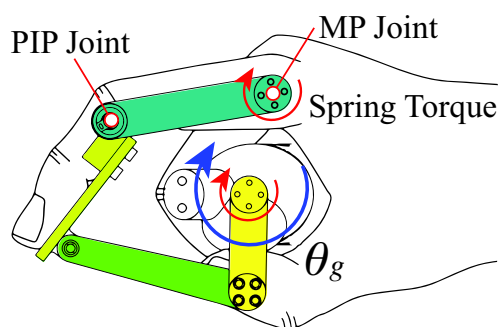


Fig.3.44 5-bar linkage gripper controller

もう一方の2節リンクは、外骨格型リンク機構上で人差し指の末節の腹部に当たる位置に回転ジョイントが配置されるように接続されている。さらに、静止節上には傘歯車で接続されたアクチュエータ上に搭載されているエンコーダを用いて、外骨格型リンクの姿勢を計測するだけでなく、バイラテラル制御時にはアクチュエータを駆動して力を伝達する。また、図3.45のように、グリップ開閉操作部のリンク機構の両静止節にはコイルスプリングを導入し、リンク全体を人差し指側に押し付ける程度の微小なトルクを常に出力

させ、装着機構がないにも関わらず、人差し指の動作に追従することが可能である（図 3.46）。バイラテラル制御のためのアクチュエータは、減速機付き DC モータ（Maxon 製：DC motor RE13 + GP13A）を使用している。また、グリッパ開閉操作部の性能諸元を表 3.8 に示す。

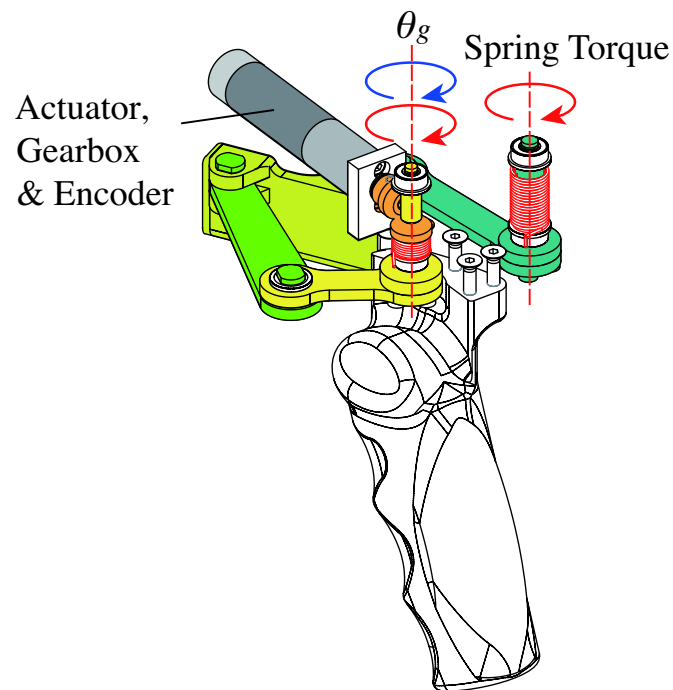


Fig.3.45 Gripper controller mechanism

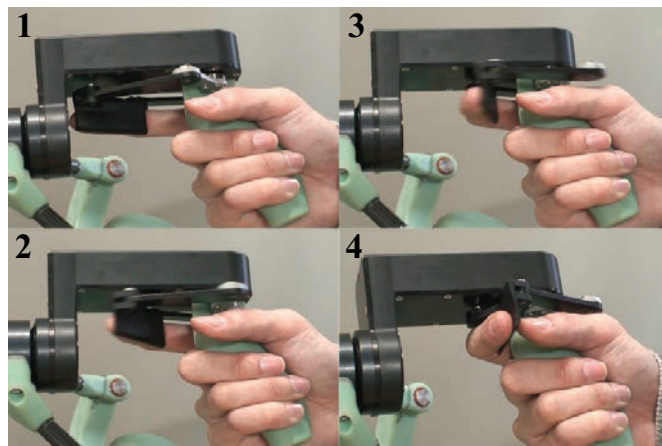


Fig.3.46 Workrange of the gripper controller mechanism

Table.3.8 Specification of gripper controller

Actuator Power	2 W
Gear Reduction Ratio	17/1
Encoder Count	1024 count/round
Feedback Force	1 N

グリップ開閉操作部のリンク設計

グリップ開閉操作部のリンク長設計は、グリップ開閉操作部を円滑に操作する上で非常に重要である。2 節の外骨格型リンクのリンク長は、人体寸法・形状データベース（文献 [82]）を参考に、末節と中節を合わせて 40 mm，基節では 49 mm とし、リンク長が平均的な成人男性の人差し指の長さに合うように設定した。一方の 2 節のリンク機構は、設計した長さによっては可動範囲内でリンクが特異姿勢をとって、指先での操作ができなくなるという問題も存在する。また、バイラテラル制御を行って指先に力を還す際にも、特異姿勢によって十分に力を伝達できないことも考えられる。そこで、リンク長設計を適切に行なって、これらの問題を回避することとした。まず、これらのリンク長設計を行うために、リンク系の計算モデルを図 3.47 と設定した。

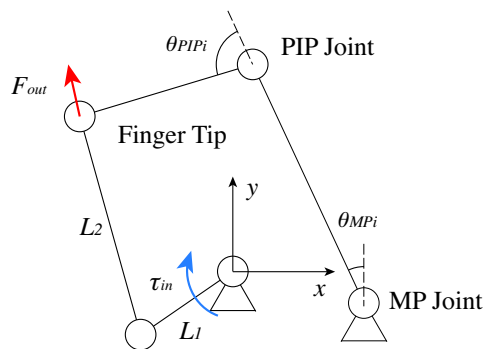


Fig.3.47 Calculation model of the gripper controller

ここで 5 節パラレルリンク機構に対して、入力トルクは τ_{in} の 1 つしかないため、リンク系全体としては出力が不定となる。しかし、静止節上のコイルスプリングが発生するトルクもリンク系に付与されること、そしてリンク系が人差し指と親指の一定の摘み動作に常に追従することから、実際には 1 自由度が固定されて、入力トルクは τ_{in} だけで指先への力 F_{out} を出力可能である。そこで、まずは親指と人差し指の摘み動作が常に一定の動作をすると仮定し、その軌跡を表 3.7 の PIP, MP ジョイントの最大角度 $\theta_{PIPmax}, \theta_{MPmax}$

から次のように指定する ($i=1\sim n$ (n は分割数)).

$$\theta_{MPi} = \theta_{MPmax} \frac{i}{n} \quad (3.14)$$

$$\theta_{PIPi} = \theta_{PIPmax} \frac{i}{n} \quad (3.15)$$

以上の関節角度の関係を用いて、PIP 関節と指先のリンク位置を常に設定する。この結果を用いてリンク系全体の姿勢を計算し、さらにアクチュエータの入力トルク τ とヤコビ行列 J を設定すると各関節における力 F を次の数式で表現できる。

$$F = \Sigma(J^T)^{-1}\tau \quad (3.16)$$

この計算される力 F のうち、指先への出力である F_{out} を計算することで、まだリンク長が設定されていない2節の姿勢計測用リンクの長さを設定する。姿勢計測用リンクのリンク長が変化することでその出力が変化することになるが、先に設定した人差し指の軌跡は常にその設定通り運動することではなく、若干ずれた運動をするため、それに伴って F_{out} も変化する。そこで、軌跡がずれた場合に異常に大きい力や小さい力が出力されることを防ぐためには、可動範囲内で出力 F_{out} ができるだけ一定となることが求められる。以上の条件を持つリンク長の組み合わせを、数値計算を総当り的に行って選択する。

計算した結果の例として、図 3.48 に $L_1 = 31$ mm, $L_2 = 54$ mm の時の可動範囲内の F_{out} を、図 3.49 に $L_1 = 27$ mm, $L_2 = 56$ mm の F_{out} を示す。分割数 $n = 10$ とし、 $i = 0$ は人差し指と親指を開いた状態、 $i = 10$ は人差し指と親指を閉じた状態を表している。

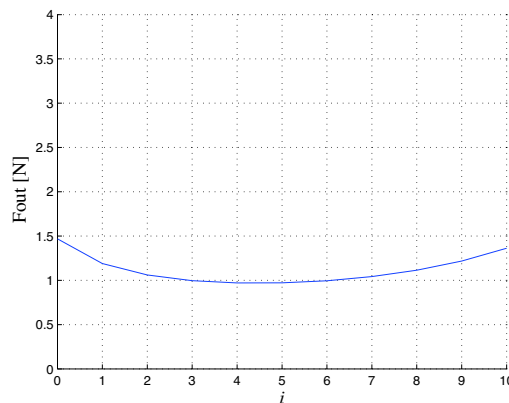
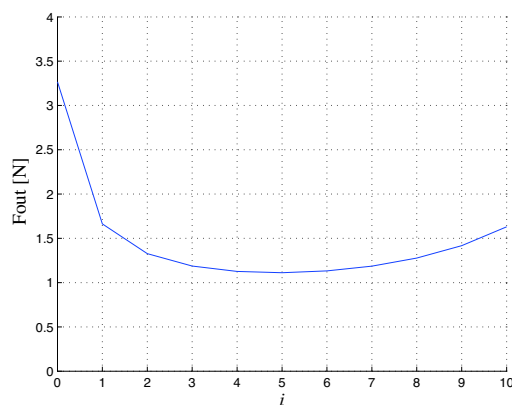


Fig.3.48 Output force trajectory ($L_1 = 31, L_2 = 54$)

Fig.3.49 Output force trajectory ($L_1 = 27, L_2 = 56$)

以上の2つを比較して分かる通り，リンク長の選択によってその出力の傾向が大きく異なり，特に L_1 が短くなることで $i = 0$ の時に特異姿勢に近くなって，出力が大きくなってしまう．他にも行った数値計算の結果，それぞれのリンク長は $L_1 = 31$ mm, $L_2 = 54$ mm と設定した際に，出力 F_{out} の可動範囲内での変動が最も小さくなり，さらに特異姿勢も回避可能となる．したがって，このリンク長の組み合わせを参考に，実際のリンクを製作した．

3.4 Armrest Joystick の全体構成

図 3.50 に示す Armrest Joystick は、3 自由度位置操作部、3 自由度姿勢操作部、グリッパ開閉操作部の 3 つの操作部で構成され、制御装置を含まない状態で、全質量 9.1 kg と非常に軽量である。



Fig.3.50 Armrest Joystick

また、運搬時には折り畳み椅子を折り畳み、姿勢操作部を位置操作部からボタンだけで簡単に着脱できるため、持ち運びも容易である (図 3.51)。制御装置は、次章で述べる制御用マイクロコントローラや PC が必要となり、現状では外部に配置している。しかし、マイクロコントローラ一式が 100 g 程度、制御用 PC は約 1 kg で、これらを含めても十分に軽量の構成である。さらに実用化の段階で、制御装置を Armrest Joystick に内蔵し、タブレット PC や PC 用モニターアーム (市販で約 1~5 kg)、マイクロコントローラ収納ケースによって制御装置を一体化した場合にも、全質量を最大 15 kg 程度に収め、十分な携帯性が確保されると想定している。Armrest Joystick は電気式のマスタ・スレーブ操縦桿であり、全体が電氣的に接続されている必要があるが、姿勢操作部と位置操作部の接続部には電源・信号用コネクタを設けて、電氣的な着脱も容易に実現した (図 3.52)。



Fig.3.51 Mobile form of the Armrest Joystick

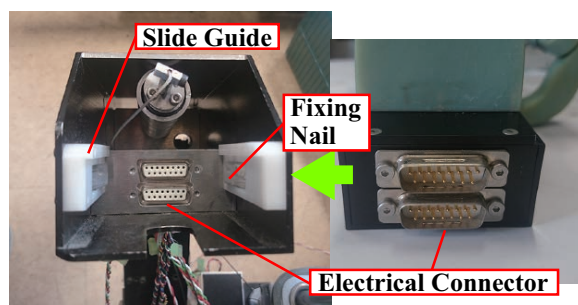


Fig.3.52 Mechanical and electrical connectors of the Armrest Joystick

3.5 Armrest Joystick の制御システムの設計開発

ロボット遠隔操縦桿 Armrest Joystick は電気式マスタ・スレーブ操縦桿であり、制御システム設計も重要な要素である。以下に Armrest Joystick で用いる制御系について述べる。

3.5.1 Armrest Joystick の制御システム構成

実際に構築した制御システム構成を図 3.53 に示す。

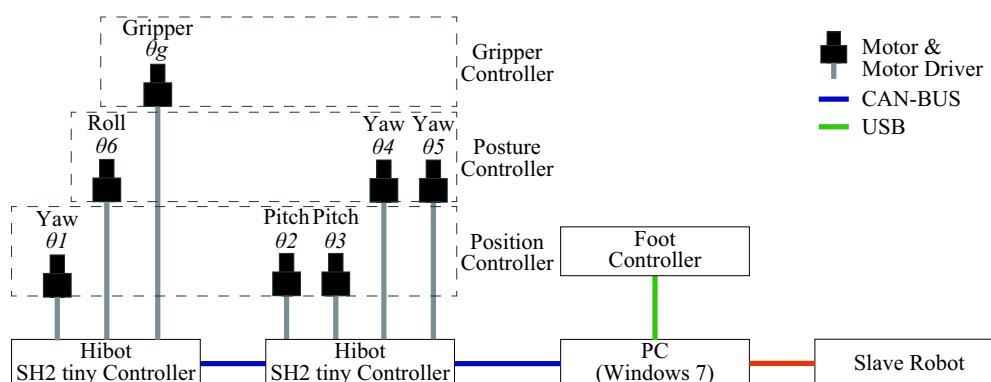


Fig.3.53 System architecture of the Armrest Joystick

今回は、現在の屋内災害現場では通信の信頼性の面から全てのロボット間の接続が有線で行われていることを踏まえて、関係する全てのシステムを有線によって接続した。各アクチュエータとアクチュエータと一体になったエンコーダ・ホールセンサは、操縦桿外部に配置されたマイクロコントローラ（Hibot 製：TITech SH2 Tiny Controller）とモータドライバ（Hibot 製：3-Axes DC Power Module）に接続され、位置または電流制御される（文献 [83]）。また、全てのマイクロコントローラは CAN-BUS によって PC に接続され、各軸の回転角度や各モータの電流値の計測値を送信し、PC からは各関節の目標角度または目標電流値を受信する。スレーブ側のロボットとの接続は、操作対象となるロボットに応じて、接続の方式を自由を選択することができる。本論文内でスレーブ側のロボットとして使用した、Helios IX や Helios X の 2 つのロボットも、前者ではイーサネットを選択し、後者では RS-232C を利用しているように、状況に応じて柔軟に通信方式を選択することができる。これらの接続は現状では最長でも 10 m ほどで、全て近距離に配置されるため、制御時の通信の遅延は操縦者には感じられない。しかし、実際の運用ではさらに遠距離での操作を行うことが前提となるため、必然的に遅延が発生することとなり、その影響を考慮してシステムを構築していく必要がある。

3.5.2 Armrest Joystick を用いたロボットの制御

実際にマスタ・スレーブ制御を行う上で、PC 上で行っている制御方法について詳細を述べる。

ここでは、スレーブ側のロボットとして、Helios IX（文献 [65]）と Helios X（文献 [66] [77] [84] [85]）の 2 つのロボットに搭載される 7 自由度ロボットアームに対して設計したシステムについて述べる。まず、操縦桿より受信した Armrest Joystick の各関節角度から、PC 側では、折り畳み椅子の後脚固定の座標系 $O-XYZ$ 上での操縦桿先端位置 (X_{J5}, Y_{J5}, Z_{J5}) と、アームレスト先端部に固定された座標系 $o-xyz$ での姿勢操作部の座標系 $o'-x'y'z'$ への姿勢変換行列 \mathbf{T}_m 、グリッパ開閉操作部の角度 θ_g 、電流値から推定される操縦桿先端の力・トルク、グリッパ開閉操作部の力を各々計算する（図 3.54）。

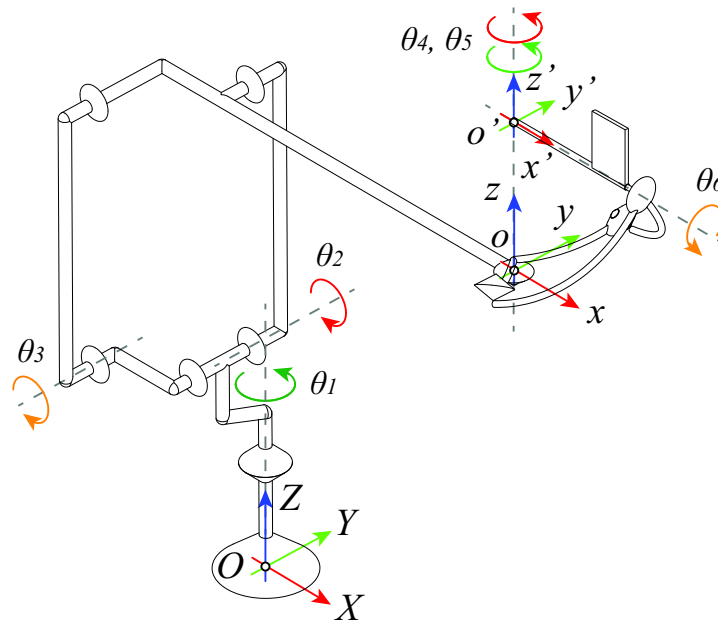


Fig.3.54 Coordinate system of the Armrest Joystick

同時に、PC はスレーブ側ロボットにも接続され、アーム先端位置 (X_s, Y_s, Z_s) 、アーム先端座標系での手首姿勢行列 T_s 、グリッパの角度 θ_{gs} 、力センサの値を得る。以上の値を相互に受け渡して、マスタ操縦桿とスレーブ側のロボットアームにおける逆運動学や静力学解析を行って、目標関節角度や目標電流を導出、その結果をマイクロコントローラに送り、各アクチュエータの位置あるいは電流制御を行う。これら全ての制御は、全体として周期 2.3 msec と、人間の感覚器官の認知間隔である約 1 msec には至らないものの、高速な制御を実行可能である。

他にも、Armrest Joystick を位置や姿勢を直接入力するのではなく、ジョイスティック方式の操縦桿としても使用することができる。その場合には、先程も計算を行ったアーム先端位置 (X_{J5}, Y_{J5}, Z_{J5}) や姿勢変換行列 T_m を利用して、基準位置からの変位を検出し、スレーブ側のロボットに対応させた位置や姿勢の速度制御を行って、ジョイスティック方式の制御を行うことができる。

3.5.3 制御システム上のその他の要素

Armrest Joystick を使用する際には、ロボットとスレーブ側の周辺の状態を常に正確に把握しておく必要がある。そこで情報を把握するためのインターフェースとして、PC ディスプレイ上の操作画面 (GUI) やカメラ用モニタを製作した。GUI は Microsoft の Visual Studio 2010 で製作した。例として、Helios X の GUI を図 3.55 示す。

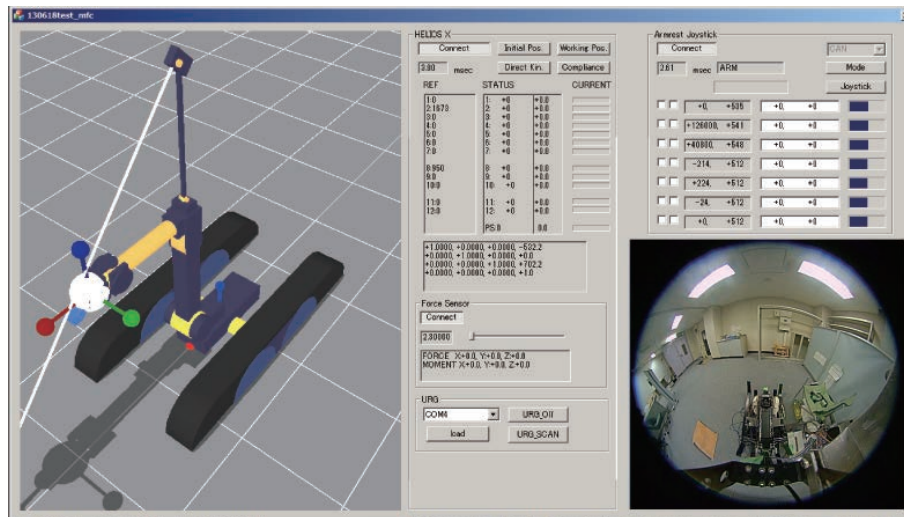


Fig.3.55 Graphic user interface for the Helios X controller

Armrest Joystick と Helios X の各モータの角度や電流値，Helios X の現在の姿勢や力センサの状態を視覚的に確認できる。他にも，Armrest Joystick の制御対象を変更したり，位置や姿勢，力やトルクのマスタ・スレーブ間の倍率を変更するための，制御パネルも実装している。また，Helios X 側のカメラ（オプト製：NM-33M）で取得した映像も表示可能で，ロボットの周囲環境を簡単に確認することができる。

これらの基本的なインターフェース以外にも，さらに操作の利便性を向上させるため，Armrest Joystick の制御対象を変更したり，位置や姿勢，力やトルクのマスタ・スレーブ間の倍率を変更といった GUI で制御する機能の一部を，3 ボタン式のフットスイッチ（THANKO 製：USFOTS3S）を利用して代替でき，利便性を向上させることができる。さらに，カメラ画像をより大きく，鮮明に確認するために，別途軽量のタブレット PC を導入して，カメラ画像のみ独立に確認する機能も選択可能としている。



Fig.3.56 3-buttons USB foot switch

3.6 まとめ

本章では、提案する Armrest Joystick の詳細設計について述べた。3 自由度位置操作部は鉛直軸周りに回転可能な 4 節平行リンク機構により構成し、操作力を低減するために非円形プーリ-バネ系による自重補償機構を導入した。3 自由度姿勢操作部は 4 節球面平行リンク機構ならびにこれに保持される回転軸により構成し、シリアルリンク系との比較、特異点解析により採用した機構の優位性を明らかにした。1 自由度グリッパ開閉操作部は、人のピンチング動作の画像解析に基づき、指先に滑りを生じない外骨格型 5 節リンク機構を新たに提案し、指の角度に関わらず指先目標力を力提示可能なようにリンク長を最適化した。構成した Armrest Joystick 試作機は全質量 9.1 kg と軽量の操縦桿を実現した。

第4章

性能検証実験

本章では、開発した Armrest Joystick の性能を検証するため、各機能の単体評価実験および遠隔操作ロボットを用いて行った総合的なユーザビリティ評価実験について述べる。

4.1 携帯性に関する評価実験

Armrest Joystick の携帯性に関して検証を行った。Armrest Joystick を折り畳み、3自由度姿勢操作部を取り外した状態から、操作が可能な状態までの組立時間を計測した。全体の組み立てには全体で計 30 秒程と、短時間で組立を完了できた。また、マイクロコントローラや PC との接続も含めても、1 分以内に完了することができた。さらに折り畳んだ状態では全体が非常にコンパクトであり、質量も 10 kg 程度と軽いため、成人健常者であれば問題なく持ち上げて運搬することができた。以上から、Armrest Joystick は質量が設計仕様として設定した質量 20 kg 以内で持ち運ぶことができ、さらに設置にかかる時間も従来の普及している災害対策用ロボットの操縦桿の 2 分と比べて短時間であり、十分な携帯性を実現していることを確認した。

4.2 バイラテラル制御の位置再現性能の評価実験

Armrest Joystick に実装した最も単純なバイラテラル制御方式で、位置制御型のフォース・フィードバックである力対称型の制御（文献 [27]）を実装して、Armrest Joystick での位置再現精度を検証するための実験を行った。力対称型制御の Armrest Joystick での制御ダイアグラムは次の図 4.1 に示す通りである。

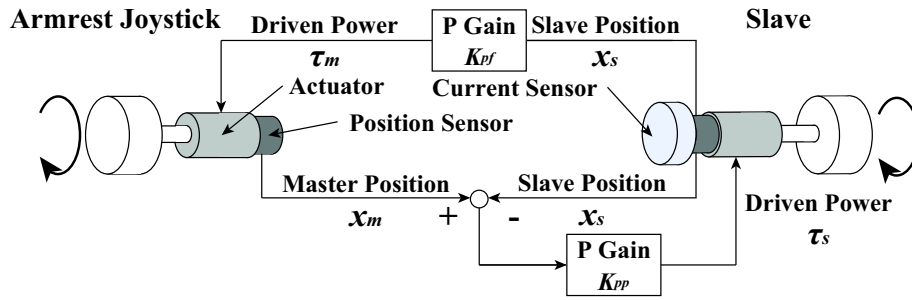


Fig.4.1 Control diagram of the position feedback control for the Armrest Joystick

したがって、このダイアグラムから、マスタ側・スレーブ側におけるアクチュエータを駆動するための入力 τ は以下の通りに計算される。

$$\tau_s = \mathbf{K}_{pp}(\mathbf{x}_m - \mathbf{x}_s) \quad (4.1)$$

$$\tau_m = \mathbf{K}_{pf}\mathbf{x}_s \quad (4.2)$$

実験では、まず PC 上でスレーブ側軌道 \mathbf{x}_s を X, Y, Z の各軸方向に生成し、その値に応じて Armrest Joystick で逆運動学を解いて位置制御を行う。次に Armrest Joystick 上に搭載されている各アクチュエータのエンコーダ、ホールセンサを用いて、各関節角度を計測した。測定された関節角度を下に、Armrest Joystick の順運動学を解いて、Armrest Joystick の先端位置と先端姿勢を計算して、その値と目標入力値の比較を行った。測定では、まず $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 90^\circ$, $\theta_3 = 90^\circ$, かつ $\theta_4 = 53^\circ$, $\theta_5 = 53^\circ$, $\theta_6 = 0^\circ$ で、地面固定座標系と位置・姿勢操作部の座標系が一致する場合を基準姿勢と設定する。そして、その姿勢から X, Y, Z 軸方向と、Roll, Pitch, Yaw 軸周りのそれぞれに対して、可動範囲内で X : 230 mm, Y : 400 mm, Z : 400 mm, Roll : 160° , Pitch : 80° , Yaw : 120° の運動を実行した。以上の各軸方向、各軸周りの動作の測定を、それぞれ 3 回ずつ行った。

計測した関節角度から手先位置を計算した結果を図 4.2, 4.3, 4.4 に、手先姿勢を計算した結果を図 4.5, 4.6, 4.7 に示す。いずれの方向の運動に対しても、指令値に対して追従する運動を Armrest Joystick が出力できていることを確認した。

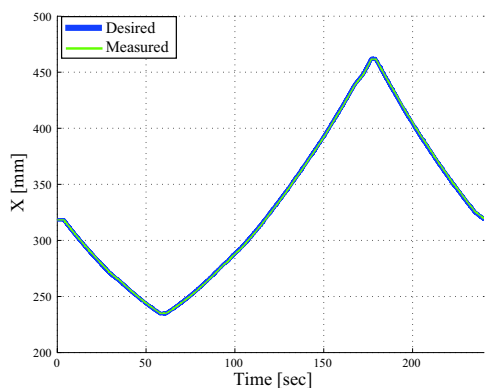


Fig.4.2 Measurement of the trajectory along X direction

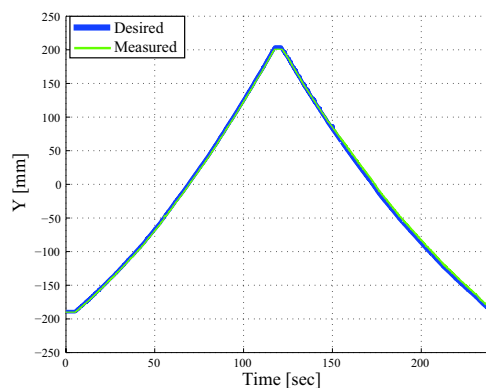


Fig.4.3 Measurement of the trajectory along Y direction

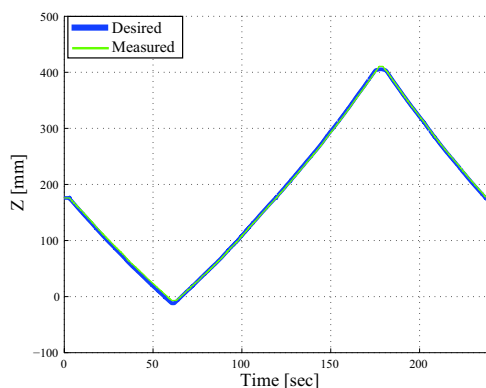


Fig.4.4 Measurement of the trajectory along Z direction

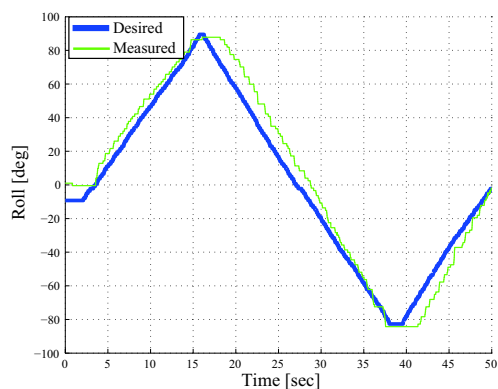


Fig.4.5 Measurement of the trajectory around Roll axis

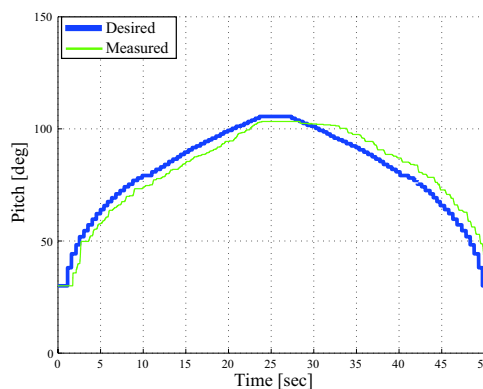


Fig.4.6 Measurement of the trajectory around Pitch axis

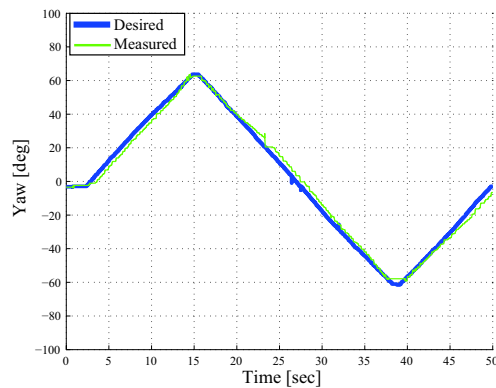


Fig.4.7 Measurement of the trajectory around Yaw axis

各方向の計測結果から、手先位置と手先姿勢の指令値と計測値の差を二乗平均平方し、可動範囲全域でその平均を計算した結果を表.4.1 に示す。

Table.4.1 RMS value of the difference between the desired and measured positions and postures

Direction	RMS [mm]	Direction	RMS [rad]
X	0.485	Roll	0.17
Y	0.346	Pitch	0.14
Z	1.025	Yaw	0.058

計算結果からもわかる通り、手先位置は誤差が小さいが、一方で手先姿勢は誤差が大きくなっている。その要因は、位置操作部に搭載しているエンコーダの分解能が高いために小さな誤差で済む一方で、姿勢操作部は搭載しているホールセンサの分解能が低いため、大きな誤差を生じている。したがって、この問題にはホールセンサではなく後付可能な小型のマグネットエンコーダを導入して、関節角度の計測分解能を向上させることで対処可能と考えている。

以上の結果から、力対称型のバイラテラル制御には手先位置、手先姿勢がスレーブ側の接触状態が表現でき、操縦者に伝達できることを確認した。

4.3 自重補償機構の性能評価実験

Armrest Joystick の位置操作部に搭載された自重補償機構の補償精度を検証し、さらに操縦者への影響を測定する実験を行った。

4.3.1 自重補償機構の精度測定実験

Armrest Joystick の位置操作部に搭載された自重補償機構の精度を検証する実験を行った。先節の実験から、Armrest Joystick では手先位置を位置制御できることが確認できているため、位置操作部の手先位置を可動範囲内で位置制御して、指定位置で静止させる時に必要な DC モータの電流を計測した。この計測した電流値の結果から、位置操作部が可動範囲内で静止するために必要な手先の操作力が計算できる。この操作力は自重補償機構によって補償しきれなかった力と釣り合っていることから、その値を利用して自重補償機構の精度を検証することができる。電流の計測には、使用しているモータドライバの電流値出力ポートから得られる電流値を、マイクロコントローラの A/D ポートを使用して計測した。

自重補償機構によって補償しきれなかった力の測定は、モータの電流値測定以外にも、外部に力センサを設置して直接的に力を計測して実施することもできる。この外部の力センサを用いた計測では、モータの電流値測定による方法より、自重補償機構によって補償しきれなかった力を正確に計測することができる。しかし、外部の力センサを用いた計測は基本的に一軸方向の力を測定になってしまうが、今回は 2 次元平面内における力ベクトルの複雑な分布状態を計測する必要がある。以上の理由から、自重補償機構によって補償しきれなかった力を、位置操作部上の DC モータの電流値を用いて簡易的に計測することとした。

位置操作部の DC モータの電流値を利用した手先での力の導出には、まず電流値から DC モータのモータ定数 25.5 Nmm/A を用いて関節トルク τ を算出し、さらにヤコビ行列 \mathbf{J} から位置操作部先端で出力している力 \mathbf{F} を求め、その結果から自重補償機構によって補償しきれなかった力を算出することができる。

$$\mathbf{F} = (\mathbf{J}^T)^{-1} \tau \quad (4.3)$$

モータの出力電流値の計測にあたっては、平行リンクが $\theta_2 = 90^\circ, \theta_3 = 90^\circ$ の姿勢を基準に、位置操作部先端を可動範囲内で X, Z 軸方向に 50 mm 毎に移動させた箇所を測定点とし、可動範囲全域で全 30 箇所を設定した。各測定点にて、10 秒間位置操作部を静止させるという動作を計 5 回計測を行った。

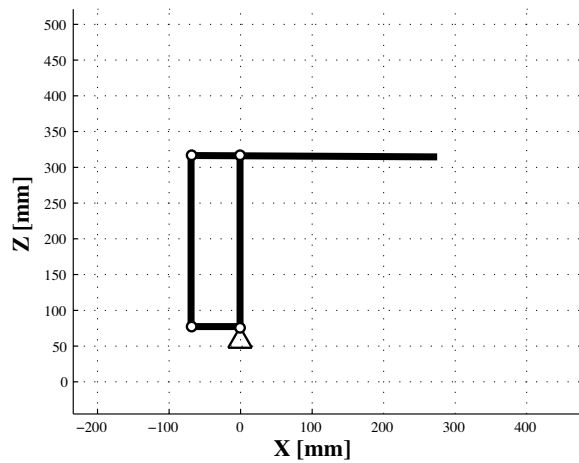


Fig.4.8 Workrange of the 3DOF position controller

図 4.9 に、各測定点での DC モータの出力トルク τ を、操縦桿先端の力ベクトル F に変換した結果を示す。

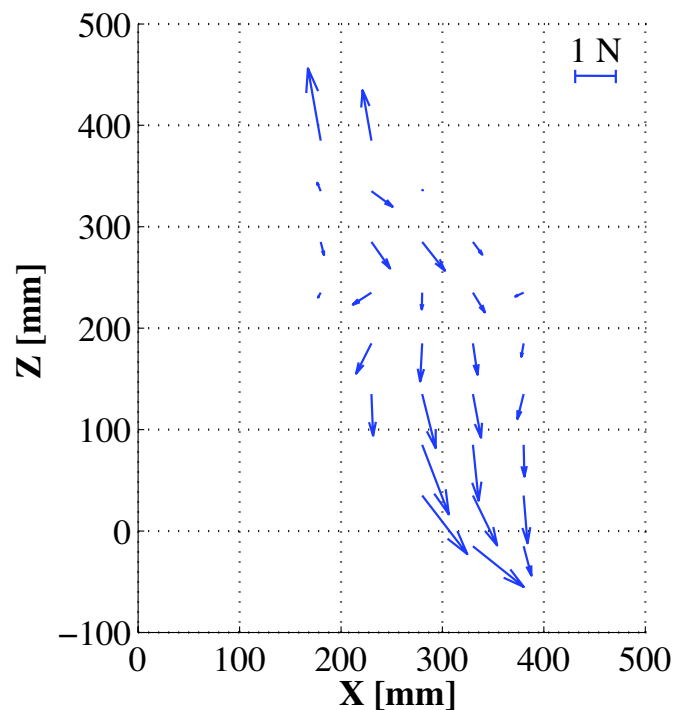


Fig.4.9 Residual force vectors at the tip of the Armrest Joystick

力ベクトルの大きさは、可動範囲内の全測定点に対する平均値が 0.86 N で、同平面内を動く操縦桿の全質量約 43 N に対して約 2% となる。また、力ベクトルの最大値は 1.96 N となり、操縦桿質量の約 5% 程度まで補償されることを確認した。このように手先位置での力の大きさは可動範囲内で最大で 5% となって、その影響は小さい上に、そ

の平均値からの変化量は操縦桿の全質量に対して 3 % と、その値の変動も小さく、可動範囲全域でほぼ一様に分布していることが確認できる。力の分布の傾向は、 $Z=350$ mm より下の領域では自重補償が過分に機能しているため、操作時には操縦桿を鉛直上方向に持ち上げる方向に操縦者は操作力を感じるようになる。一方で、 $Z=350$ mm より上の領域ではベクトルが鉛直上向きに変化しており、その領域では自重補償機構が機構質量を支えきれていないことを示している。このような傾向を示す原因としては、自重補償機構の調整不足や、プーリの設計時には考慮しなかったプーリとスプリングを結ぶワイヤ径の影響等の様々な要因が考えられる。したがって、これらの影響を再検討してより高精度の力補償を実現することができるが、力補償の精度が既に約 2 % と十分に補償されていると考え、今後の実験でもこの構成のまま使用することとした。以上の結果が示す通り、自重補償機構によって操作範囲全域で自重を完全には補償できていないものの、広い可動範囲内で操縦桿質量に対して最大 5 % 程の質量まで補償することができることを確認した。この結果によって、バイラテラル制御用に搭載されている DC モータの出力は、操縦桿質量由来のモーメントをほぼ支える必要がなく、バイラテラル制御のための出力のみを対象とすることができ、必要とされるモータ出力を大幅に軽減できることを確認した。

4.3.2 自重補償機構による操縦者への影響の評価実験

次に、Armrest Joystick の自重補償機構が操縦者の腕部に与える影響を検証する実験を行った。自重補償機構の機能の有無によって操縦者の腕部に与える操作力が異なることを踏まえ、その影響を直接的に測定するため、Armrest Joystick を操作する際の操縦者における腕部の筋肉活動を筋電位計により測定した。

筋電位を測定するに際して、筋電位計の選定を行う。通常、筋電位計は表面筋電位計と深部筋電位計の 2 つがあり、それぞれ以下の特徴を有する。表面筋電位計は計測したい筋肉付近の皮膚表面に対して電極を貼り付けて、運動の際に生じる筋肉の電気信号を測定できる。しかし、この測定方法では同時に複数の筋肉の活動の影響を受ける、深部に位置する筋肉の活動を計測することが難しい、といった問題がある。一方の、深部筋電位計は針状の電極を測定したい筋肉に挿入し、その活動筋電位を測定する。こちらは測定する筋肉に直接電極が配置されるため、より正確に筋電位を計測でき、深部の筋肉も筋電位を測定できるという利点の反面、被験者に対しての侵襲が必要であり、一般には扱いが難しい。今回は操縦桿質量が操縦者の腕部の筋肉に与える影響を測定することになるが、腕部は筋肉の配置が脚部や体幹に比べてシンプルで、さらに腕部表面に筋肉が分布しているといった状況を考慮して、表面筋電位計を用いて測定を行うこととした。実験では、表面筋電位計 (BTS 製: FREEMG1000) (図 4.10) を用いる。この筋電位計は、皮膚表面に貼り付ける Ag/AgCl 電極を介して筋電位センサを貼り付け、測定される筋電位はワイヤレスで PC に送信し、筋電位の状態をリアルタイムに確認しながら計測が可能である。



Fig.4.10 FREEEMG1000

実験方法は、まず Armrest Joystick を $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 90^\circ$, $\theta_3 = 90^\circ$ で地面固定座標系 $O - XYZ$ と位置操作部先端の座標系 $o - xyz$ ・姿勢操作部先端の座標系 $o' - x'y'z'$ が一致する場合を基準姿勢とする。姿勢操作部は実験中に動かないように機械的に固定した。その姿勢から操縦者が位置操作部だけを各軸方向に動かして、設定する可動範囲内を往復運動させる。各方向の可動範囲として $X : 250 \text{ mm}$, $Y : 400 \text{ mm}$, $Z : 500 \text{ mm}$ を設定する。以上の運動をさせた場合に、操縦者に筋電位計を取り付けて、筋肉の伸縮の活動を計測した。また、Armrest Joystick を使わずに同じ運動を行った場合の筋電位の測定も行った。一回の測定における位置操作部先端の運動は、後でデータをまとめて扱う際に異なる被験者間で比較が可能ないように、図 4.11 と共通の運動を定めた。

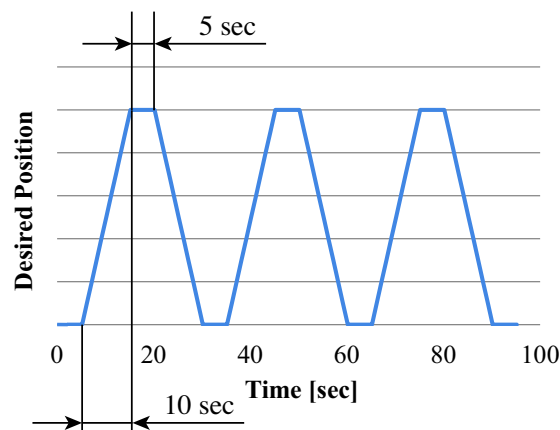


Fig.4.11 Desired tip position of the position controller

また、操縦者がこの運動を実行しやすくするために、実験中はメトロノームのリズムを流して速度を一定に揃えた。以上の流れで行う測定を、 X , Y , Z の各軸方向にそれぞれ 4 回ずつ行った。

筋電位の測定を行うに際して、測定に必要な筋肉を設定する。手先の 3 自由度の位置を各軸方向に対して移動させる場合、肩の水平内転と水平外転、屈曲と伸展、肘の屈曲と伸

展が大きな可動範囲が必要となるのは，第 3 章でも検討した通りである．したがって，測定する筋肉もこの動作にもとづいて設定する必要がある．各運動に対して機能している筋肉をまとめたものが，次の表 4.2 である．

Table.4.2 Muscle contribution for the shoulder and elbow movement

Position	Movement	1st	2nd	3rd
Shoulder	Horizontal Flexion	Pectoralis major	Deltoid (anterior)	Teres major
	Horizontal Extension	Rear spine	Deltoid (posterior)	Teres major
	Flexion	Deltoid (anterior)	Pectoralis major (upper)	Biceps
	Extension	Rear spine	Teres major	Deltoid (posterior)
Elbow	Flexion	Biceps	Brachial	Brachioradialis
	Extension	Triceps	Anconeus	-

以上のデータからわかる通り，操縦桿質量を支えることに大きく寄与すると想定される右肘の屈伸運動では，腕橈骨筋，上腕二頭筋，上腕三頭筋の筋電位を測定することとした．肘筋の筋電位では，操縦者が Armrest Joystick を使用する際に，アームレストと腕部が接触する位置に配置されているため，今回の実験では計測を断念した．また，右肩の屈伸と水平内外転の筋電位は，総合的に全ての筋運動に関わっている前部三頭筋，後部三頭筋の筋電位を測定することとした．筋電位計はサンプリング周期 1 msec で計測を行った．被験者は 8 名（23 から 31 歳の成人男性健常者：平均年齢 26.3 歳）とし，自重補償の有無の順番は被験者全体を 2 組に分けて，影響が出ることがないようにカウンターバランスをとった．本実験は，本学の人を対象とする研究倫理審査委員会の承認のもと，「ロボットアームの遠隔操縦における操縦者の疲労度が操作に与える影響の研究」（承認番号：第 2015024 号）として行われ，ヘルシンキ宣言の内容を遵守した．また，実験開始前に実験参加者からインフォームド・コンセントを得て行った．

まず，被験者が腕を操縦桿に載せて操作したかを検証するために，操縦桿の図 4.12 のジョイントの高さの変化 ΔH を計測した．

$$\Delta H = H_{max} - H \quad (4.4)$$

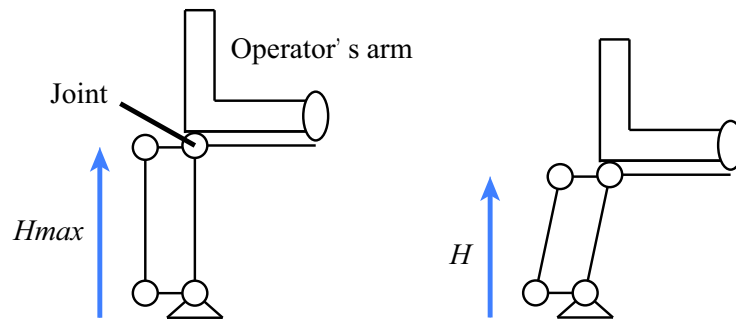


Fig.4.12 Calculation model of the elbow displacement by the joint height

ΔH の実験を通しての平均値と、 ΔH の最大値の平均値を表 4.3 に示す。この結果から実験中に肘部に近いジョイントはあまり高さが変化していないことがわかる。肘部の高さの変化が小さく、肘部さえ設置していれば、腕部はアームレストに触れていることとなる。また、実験では手首操作部が基準姿勢（アームレストと腕が平行となる姿勢）となるように固定されていることから、手首を動かしてアームレストと腕が離れるような大きな動きを実験中に行うことも難しいと考えられる。以上から実験中の被験者は腕をアームレストに載せて操作していたものと推測される。

Table.4.3 Displacement of height at the joint when the operator moved the controller

		ΔH at X [mm]	ΔH at Y [mm]	ΔH at Z [mm]
With WCM	Average	11.54	0.78	2.25
	Maximum	28.19	3.06	7.52
Without WCM	Average	11.73	1.35	3.58
	Maximum	29.1	5.01	11.9

計測された筋電位は、まず 1 回の実験で計測される筋電位計の平均筋電位を計算した後、4 回の測定間で平均値を計算した。さらに、その平均値を全被験者間で平均と標準誤差を計算した結果が、図 4.13, 4.14, 4.15 である。

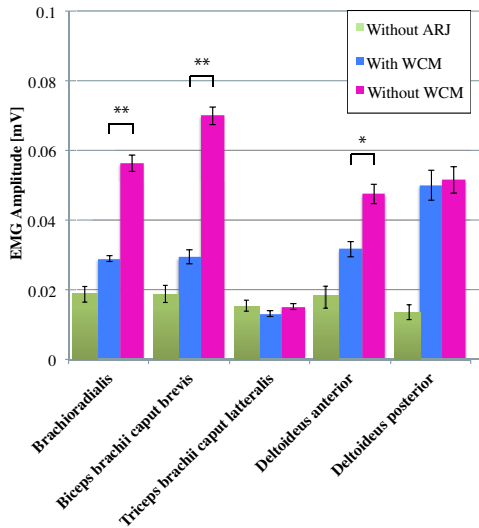


Fig.4.13 Average EMG amplitude when the operators moved the controller along X direction (* : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$)

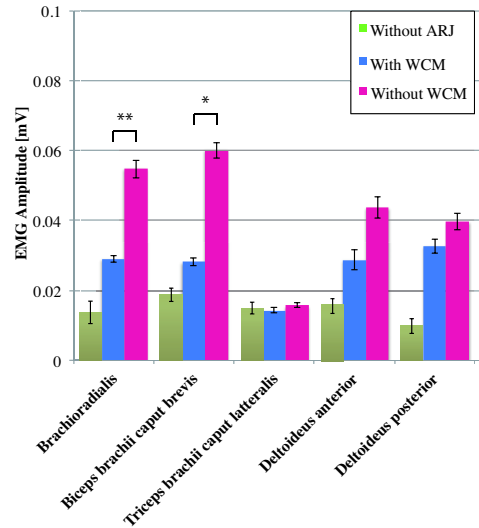


Fig.4.14 Average EMG amplitude when the operators moved the controller along Y direction (* : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$)

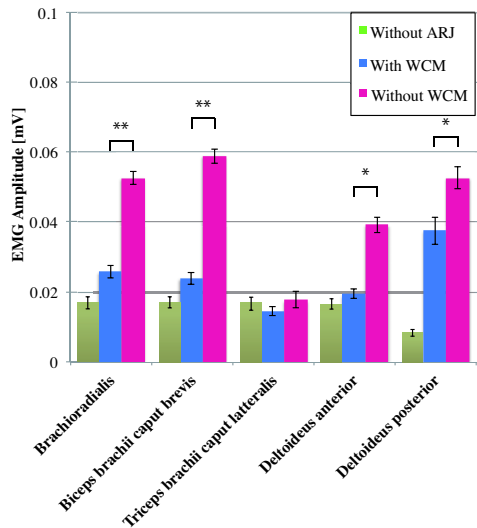


Fig.4.15 Average EMG amplitude when the operators moved the controller along Z direction (* : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$)

まず、Armrest Joystick を使用せずに手先を運動させた場合の筋電位の結果については、これが今後の筋電位の評価の基準となる。

次に Armrest Joystick を使用した場合については、いずれの軸方向の運動に対しても、自重補償機構を機能させたことで全ての測定した筋肉で筋電位が低下し、操作中の筋肉の負担を軽減できることを確認した。筋負担軽減の影響は、特に腕橈骨筋と上腕二頭筋で顕著な影響を示している。この要因としては、肘の屈曲・伸展運動が質量の影響が最も大き

い鉛直方向の運動であるためと考えられる。

また、測定した筋電位の結果に対して、表 4.4 に示す通り Wilcoxon の符号付順位和検定を行った。

Table.4.4 P-value of the Wilcoxon signed rank test for the EMG amplitude when the operators moved the Armrest Joystick

Direction Muscle Name	X	Y	Z
Brachioradialis	0.00781	0.00781	0.00781
Biceps brachii caput brevis	0.00781	0.00156	0.00781
Triceps brachii caput brevis	0.109	0.25	0.195
Deltoideus anterior	0.0156	0.0546	0.0156
Deltoideus posterior	0.945	0.109	0.0156

全方向の運動で腕橈骨筋、上腕二頭筋で有意差が、前部三頭筋と後部三頭筋でも方向によっては有意差を確認することができた。以上の結果から、自重補償機構が腕部の筋負担を軽減させること、特に重力に逆らう方向の運動へ影響が大きいことを確認した。また、上腕三頭筋では有意差が得られなかった。この筋肉は主に肘の伸展運動を担っているが、腕が重力によって鉛直下方向に引っ張られるため、この運動は自重補償機構の機能の有無に関わらず、どちらも自然とその運動が可能であったことが要因と考えられる。

一方で、自重補償機構を機能させた場合の筋電位は、Armrest Joystick を使用しなかった場合に比べて、筋電位が大きくなるという結果となった。本来であれば、自重補償機構を機能させた場合の筋電位の結果は Armrest Joystick を使用しなかった場合と同様の値を示すか、あるいは下回る結果が得られるはずだが、本実験では反する結果となった。その原因としては、今回の操縦桿では自重補償機構によって質量が完全に補償されていないことで操作力が大きくなってしまったことに加え、Armrest Joystick を動かす際に操縦者にかかる操作力は質量だけではなく、慣性モーメントによる影響もあること等が考えられる。したがって、操縦桿を動かす際には常に相応の筋負担が必要となるが、その影響を小さくするためには腕の重さまで考慮した自重補償機構と機構のさらなる軽量化が今後必要不可欠となる。しかしながら、自重補償機構を機能させていない場合の筋電位に比べると、機能させた場合に筋電位が大きくなり低下することは変わらない。したがって、ワイヤ・プーリを利用したシンプルかつパッシブな機構で操縦桿の質量を支持することで、操縦者の負担軽減は実現されており、本操縦桿の有効性に問題はないと考えられる。

以上の結果と考察から、位置操作部の自重補償機構によって腕部の筋肉の負担を実際に大きく軽減でき、小さな操作力で操縦者が利用できることを確認した。

4.4 バイラテラル制御の力再現性能の評価実験

Armrest Joystick に実装したバイラテラル制御のうち、力を還すことをベースとしたフォース・フィードバック制御の中で最も単純な力逆送型制御（文献 [27]）を実装して、各方向への力、トルク出力の計測を行い、その精度を検証した。

実験では、力対称型制御の Armrest Joystick での制御ダイアグラムは次の図 4.16 に示す通りである。

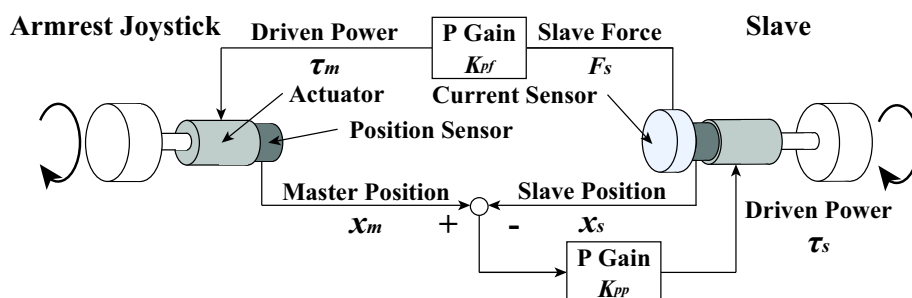


Fig.4.16 Control diagram of the force reflection control for the Armrest Joystick

したがって、ダイアグラムから、マスタ・スレーブに搭載されるアクチュエータを駆動するための入力 τ は以下の通りに計算される。

$$\tau_s = K_{pp}(x_m - x_s) \quad (4.5)$$

$$\tau_m = K_{pf}F_s \quad (4.6)$$

実験では、まず PC 上でスレーブ側の力とトルクの軌跡 F_s を X, Y, Z の各軸方向、Roll, Pitch, Yaw の各軸周りに生成し、その値に応じて Armrest Joystick で静力学を解いて力制御を行う。ここで、位置操作部と姿勢操作部の制御に機構質量は考慮しない。位置操作部の質量は、5.3.1 の自重補償機構で精度測定を行ったことで、十分に機構質量が補償されていると考えたからである。姿勢差操作部の質量も、機構の質量があまり大きくないことを考慮した。

Armrest Joystick の姿勢を $\theta_1 = 0^\circ, \theta_2 = 90^\circ, \theta_3 = 90^\circ$, または $\theta_4 = 53^\circ, \theta_5 = 53^\circ, \theta_6 = 0^\circ$ で、地面固定座標系と位置・姿勢操作部の座標系が一致する場合を計測姿勢と設定する。力とトルクの計測は図 4.17, 4.18, 4.19 のように、力センサとワイヤを接続して計測した。ここで、位置操作部先端で生じる力とトルクは 6 軸力センサ（ミネベア製：OPFT-220N-B）、指先で生じる力は力センサ（SHIMPO 製：FGP-5）で計測した。これらの計測のうち、力の計測は力センサで直接計測できるが、トルクは計測を簡単に行うために、まず姿勢操作部の外周部にワイヤを接続し、力センサで軸周りの力を計測し、計測される力を回転中心からの距離に応じて出力トルクに変換することとした。

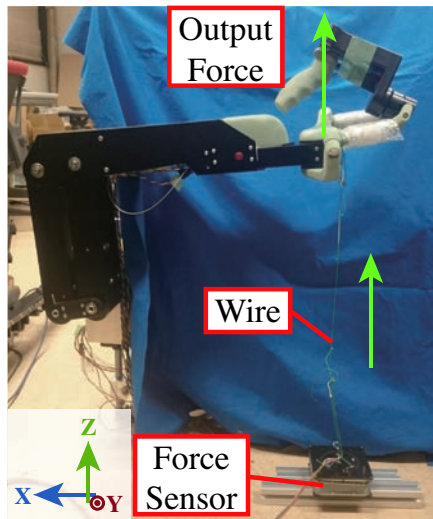


Fig.4.17 Output force measurement along X, Y and Z direction of the position controller

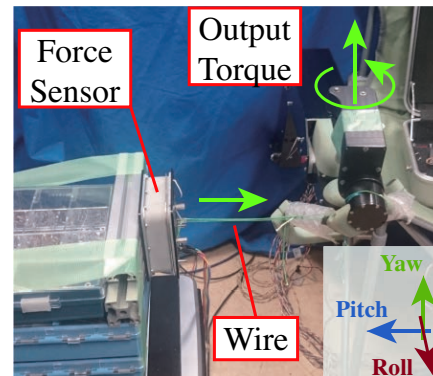


Fig.4.18 Output torque measurement around Roll, Pitch and Yaw axis of the posture controller

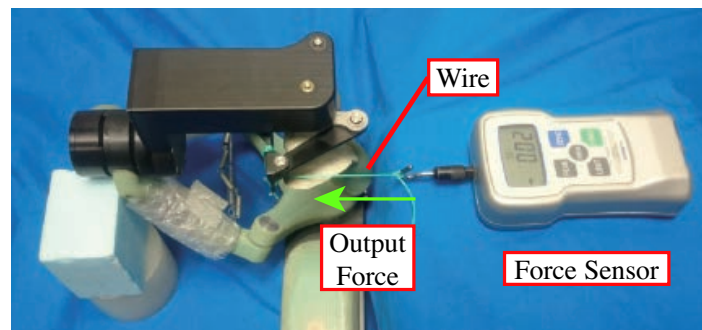


Fig.4.19 Output force measurement of the gripper controller

操作部先端における力の計測結果を図 4.20 に、トルクの計測結果を図 4.21, グリッパ開閉操作部先端における力の計測結果を図 4.22 に示す.

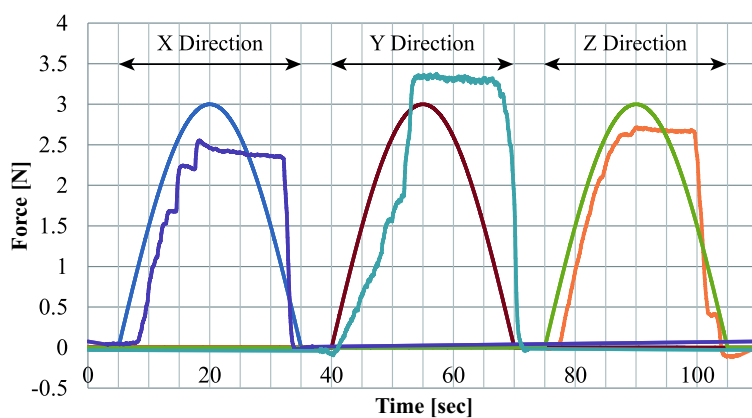


Fig.4.20 Result of the force measurement along X, Y and Z direction

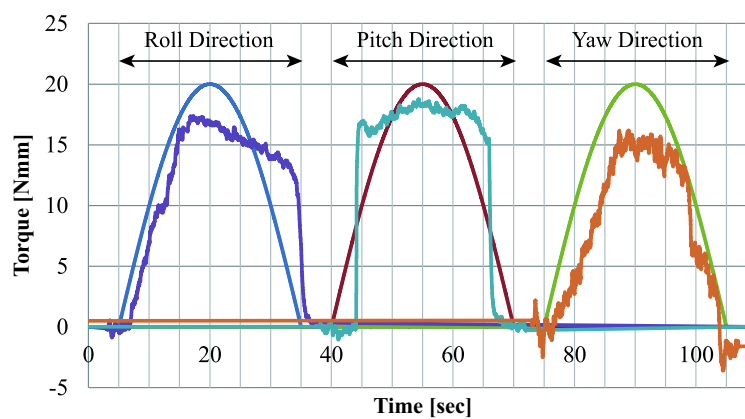


Fig.4.21 Result of the torque measurement around Roll, Pitch and Yaw axis

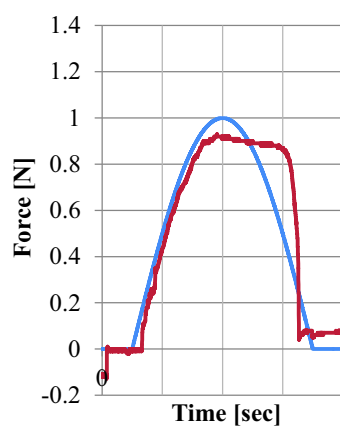


Fig.4.22 Result of the force measurement for the finger controller

力とトルク目標値に対して十分に追従しないような領域もあるが、力、トルク共に指

令値に対して出力を表現できることを確認した。操縦者が操縦桿を介して接触を認識することができる力は、手先では 1.5 N, 指先で 25~140 mN 程度であるため (文献 [68][69]), Armrest Joystick が操縦者に接触を掲示するだけの力を出力できることを確認した。指令値に対して最も追従していないのは、特に力とトルクの変化するときである。このような影響が見られるのは、機構やアクチュエータについての減速機にはそれぞれ摩擦の影響があり、運動の方向が変化する場合にはその効果が非常に大きくなることに影響していると考えられる。それ以外にも、自重補償機構では補償しきれていない操作部の質量も同様に影響したと考えられる。これらの影響は、摩擦や機構質量の影響を制御系に取り入れることで改善できると考えている。しかし、Armrest Joystick にて一定のロボット側の環境が再現できていることを考慮して、以後は現状の簡単な制御系を用いることとした。

以上の結果から、力逆走型のバイラテラル制御によって手先位置、手先姿勢、グリップ開閉操作部の力とトルク出力でき、スレーブ側の接触状態を掲示、操縦者に伝達できることを確認した。

4.5 ユーザビリティに関する評価実験

製作したロボット遠隔操縦桿 Armrest Joystick を使用して、実際にロボットを遠隔操作する際のユーザビリティの評価実験を行った。

4.5.1 レスキューロボット Helios IX

まず、実験に使用するレスキューロボット Helios IX の性能の詳細を述べる (文献 [65])。実験に使用するレスキューロボット Helios IX を図 4.23 に、またその性能を表 4.5 に示す。



Fig.4.23 Helios IX

Table.4.5 Specification of the Helios IX

Weight	44 kg
Size (W × L × H)	530 × 570 × 350 mm
Bodyspeed	1.9 m/s
Peak force	70 N

Helios IX は、左右を独立に制御可能な揺動クローラを利用した不整地踏破性能に優れた車体に、6 自由度を持つロボットアームとその先端の高把持力の 1 自由度グリッパ、さらにロボットアームの途中には 2 自由度のカメラアームを備える。また、ロボットアーム先端には 6 軸力センサを搭載して、多方向の力やトルクを計測することができる。

さらに、操作システムは、Nintendo の Will リモコンとヌンチャクを使用して、順運動学や逆運動学を計算し、簡単に Helios IX を遠隔操作することができる (文献 [86]) (図 4.24)。

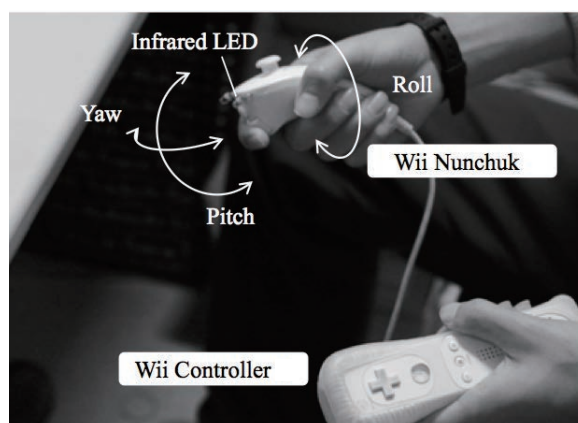


Fig.4.24 Remote controller of the Helios IX

4.5.2 レスキューロボット Helios X

次に、実験に使用するレスキューロボット Helios X の性能の詳細を述べる (文献 [77] [66] [84] [85])。実験に使用するレスキューロボット Helios X を図 4.25 に、またその簡単な性能を表 4.6 に示す。

Helios X は、クランクホイールと呼ばれる不整地踏破性能に優れた車体に、6 自由度を持つ高出力のロボットアーム ZAHN Arm とその先端の高把持力の 1 自由度グリッパ、さらにロボットアームの途中には 3 自由度のカメラアームを備える。また、ロボットアーム先端には 6 軸力センサを、グリッパ内部には圧力センサを搭載して、各方向にかかる力やトルクを計測することができる。



Fig.4.25 Helios X

Table.4.6 Specification of the Helios X

Weight	51.7 kg
Size (W × L × H)	590 × 1200 × 630 mm
Bodyspeed	1.7 m/s
Peak force	X : 220 N, Y : 220 N, Z : 440 N
Peak torque	Roll : 7.8 Nm, Pitch : 7.8 Nm, Yaw : 9.8 Nm

4.5.3 車両機構操作実験

ロボット遠隔操縦桿 Armrest Joystick を操作して、Helios X の車両部であるクランクホイールの操作を行った。操作を行うにあたって、Armrest Joystick の姿勢操作部にジョイスティック方式の操作を導入した。車両の前進・後退を姿勢操作部の Pitch 回転の速度指令によって操作 (図 4.26)、旋回運動を Yaw 回転による速度指令によって操作する (図 4.27) 方法を実装した。

この操作方式を使用して、Helios X のクランクホイールを操作できることを確認した。

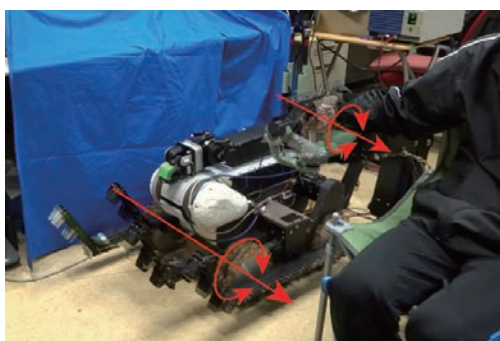


Fig.4.26 Forward and back control of the crank wheel on the Helios X

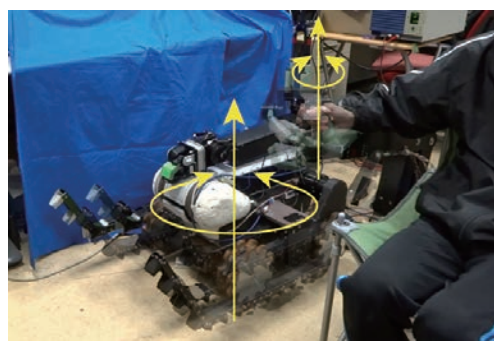


Fig.4.27 Yaw control of the crank wheel on the Helios X

4.5.4 カメラ機構操作実験

ロボット遠隔操縦桿 Armrest Joystick を操作して、Helios X のカメラシステムの操作を行った。操作を行うにあたって、Armrest Joystick の位置操作部・姿勢操作部にジョイスティック方式の操作を導入した。カメラシステムのチルト運動を姿勢操作部の Pitch 回転の速度指令によって操作（図 4.28）、左右運動を姿勢操作部の Roll 回転の速度指令によって操作（図 4.29）、前後運動を位置操作部の前後の速度指令で操作する（図 4.30）方法を実装した。

この操作方法によって、Helios X のカメラシステムを操作できることを確認した。

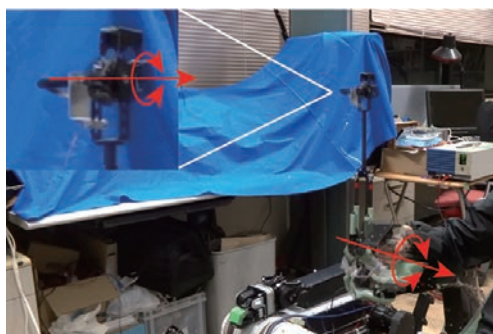


Fig.4.28 Chilt control of the camera system on the Helios X

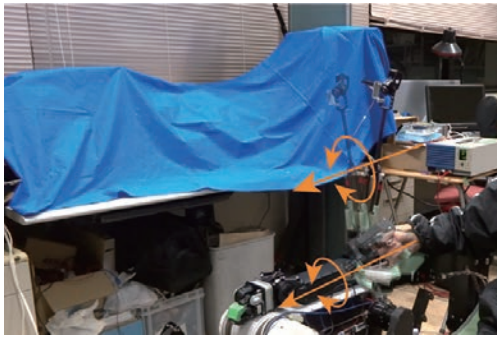


Fig.4.29 Right and left control of the camera system on the Helios X

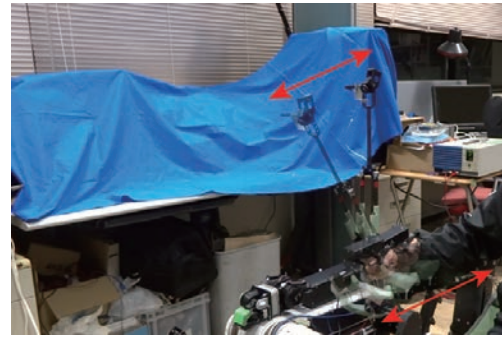


Fig.4.30 Forward and back control of the camera system on the Helios X

4.5.5 ロボットアーム操作実験

ロボット遠隔操縦桿 Armrest Joystick を操作して、Helios X のロボットアームの操作を行った。ロボットアームの制御は、Armrest Joystick の先端位置と姿勢を計算し、これらの値を Helios X 側に受渡して、その後 Helios X のロボットアームで逆運動学を計算して、各軸のアクチュエータを制御している。

Helios X のロボットアームの位置、姿勢、グリッパ開閉を各方向へ操作できることを確認した (図 4.31, 4.32)。

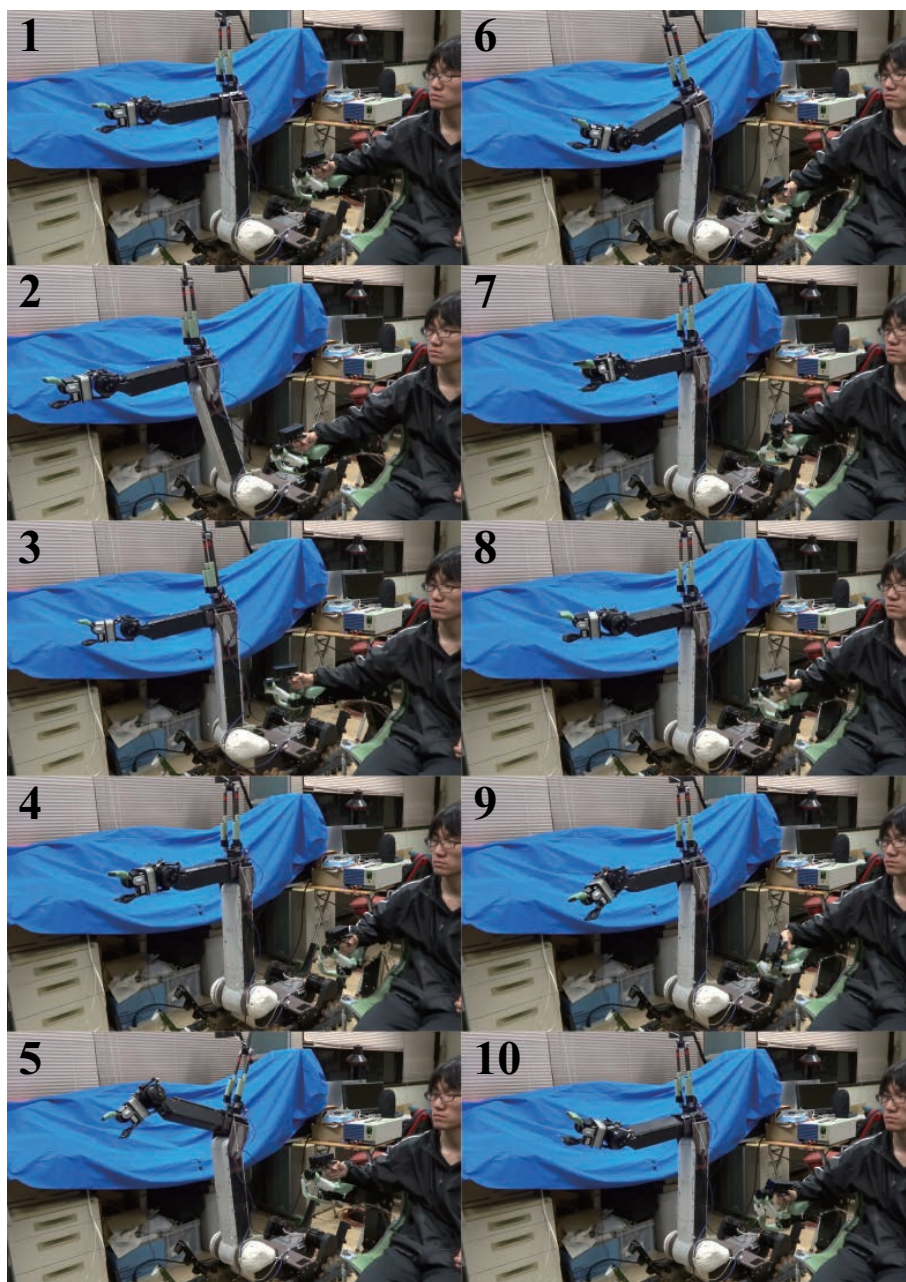


Fig.4.31 6DOF control of the ZAHN arm on the Helios X



Fig.4.32 Gripper control of the ZAHN arm on the Helios X

4.5.6 ジョイスティック方式操縦桿とのユーザビリティの比較評価実験

Armrest Joystick で初心者でも簡単にロボットアームの操作が行えるかを検証する実験を行った。実験は、操作対象を Helios IX として、被験者は Armrest Joystick で Helios IX の遠隔操作をしたことがない成人男性操縦者 5 人（平均年齢：24.8 歳）とした。操作を行う上で、まずはフォース・フィードバックを行わないユニラテラル制御で操作実験を行った。全操縦者が、Armrest Joystick 上で手先位置・手先姿勢、グリッパ開閉を操作部に入力すると Helios IX が追従して動く、という簡単な操作方法を聞いただけで、即座に Helios IX のロボットアームにおける全ての自由度の遠隔操縦を実行できた。

さらに、従来のジョイスティック & ボタン型操縦桿と Armrest Joystick のユーザビリティを比較評価する実験を行った。Helios IX で従来使用してきた操縦桿である Wii リモコン & ヌンチャク（文献 [86]）と Armrest Joystick の 2 つの操縦桿を使用して、簡単な操作説明と作業説明を行った上で、Helios IX の遠隔操作実験を行った。作業は、Helios IX で物を把持して移動させるというタスクとし、タスク完了までの操作時間を計測した（図 4.33）。

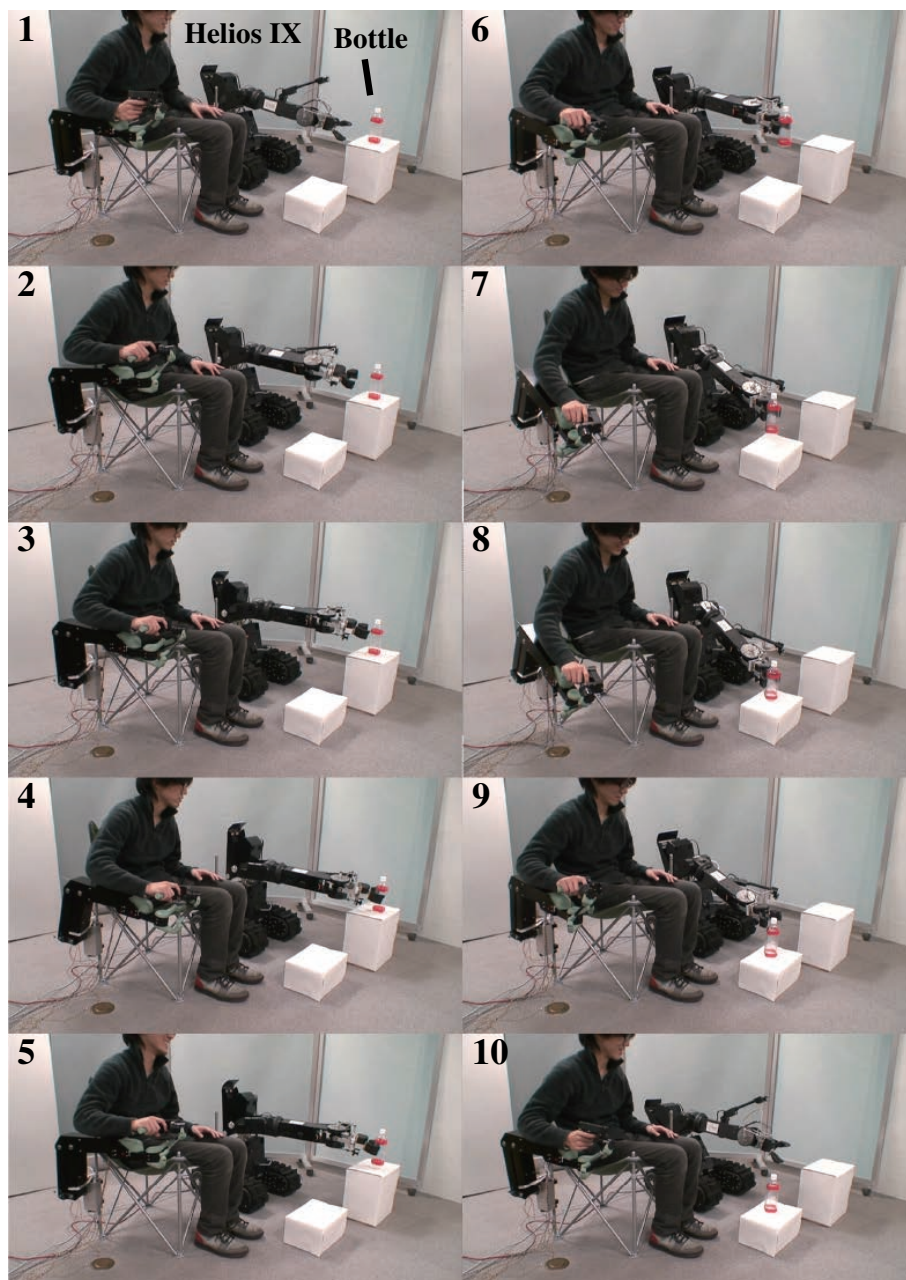


Fig.4.33 Experiment to make the Helios IX move the bottle

このタスク内容は、7自由度を全て用いた場合の作業として最もシンプルかつ実用的な作業（瓦礫除去）であるが、ユーザビリティの違いは大きく表出すると考えられる。したがって、初心者でも簡単に操作することができ、ユーザビリティの初期評価実験中でも十分に実施可能である。また、今回の実験中の評価指標としては、客観的指標として広く用いられている作業効率（作業時間）を用いて評価を行った。ユーザビリティ評価は、一般にその評価方法として、主観的指標（自覚的指標）、客観的指標（行動学的指標、生理学的指標）に分類される。

1. 自覚的指標
2. 行動学的指標
3. 生理学的指標

それぞれの特徴は、まず自覚的指標は、主に操作への被験者の自覚症状に対して、アンケートによってそのユーザビリティを評価していく手法である（文献 [87]）。しかし、被験者の自覚症状が評価指標になることから、結果の個人差が大きく、纏めて扱うことが難しいといった欠点も存在する。

次に行動学的指標は、一般に広く行われている上に、簡単に客観的な結果を得ることができる（文献 [88]）。しかし、適切な対象を設定しなければ、その評価を適切に行えないこともあり、その作業への考察が必要となる。

最後に生理学的指標は、心電図・脳波・血圧測定といった被験者への負担を直接的に計測、評価を行っていく指標である（文献 [89]）。しかし、データが環境等の変動を受けやすく、さらに平常状態を知るために日頃から身体計測を必要とするため簡単には評価が難しい、さらに計測装置が大掛かりになりがちで、簡単な計測が難しいといった特徴がある。

本来であれば、これらの指標を用いて総合的にユーザビリティ評価を行う必要がある。しかし、本実験はユーザビリティ評価の初期の段階の検証実験で、簡単な作業の評価から初めて、徐々に評価の手法を広げることが有効と考えている。そこで、本論文では、簡単に定量的に評価が可能な客観的指標の行動学的指標を用いて実験を行うこととし、今後の評価実験ではそれ以外の評価指標（自覚的指標や生理学的指標）も加えて評価を進めていくこととする。採用した行動学的指標では作業精度も計測、評価をすることができたが、操作の初期段階では被験者が細かい作業を行うことが難しいことを考慮して、作業効率（作業時間）のみを用いて測定を行った。

実験は、被験者と Helios IX を隣り合うようにして配置し、操作状況を被験者が目視で直接確認できる状態で行った。これはカメラ映像だけを見て Helios IX を操作した場合に、視覚の制限が操作結果に与える影響を排除するためである。また、本実験は Armrest Joystick の自重補償機構が機能していない状態で操作を行った。これによって、自重補償機構の操縦者への影響の結果も参考に、Armrest Joystick が最も操作の難しい条件下にあると想定されるが、他には操作性能を低下させる機能もないため、操作結果のさらなる悪化は予想しにくく、逆に自重補償機構を機能させた場合にはさらなる操作結果の向上が想定される。この検証は、後述する自重補償機構とユーザビリティ検証実験内でその有

効性を確認している。被験者は先ほどと同じ 5 人とし、各操縦桿で 3 回のタスク操作を行った。

図 4.34 に、両操縦桿の操作完了時間の平均と標準誤差を示す。

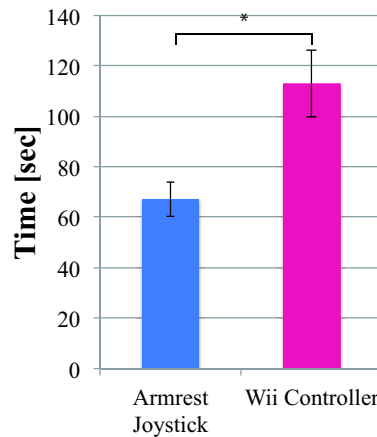


Fig.4.34 Average task time of the experiment when the operators made the Helios IX move the bottle (* : $p < 0.05$)

実験結果より、Armrest Joystick を使用した場合の操作時間が大幅に短縮し、誤差も非常に小さくなっている。その要因としては、操作者がロボットの操作量を直感的に理解できるだけでなく、多自由度を同時に操作できるため、操作時間が短縮されたことが考えられる。測定した操作時間で Wilcoxon の符号付き順位和検定を行った。その結果、 p 値は 0.039 となり、有意差が確認され、Armrest Joystick を使用したことで作業効率が向上していることを確認した。

また、この実験で被験者に双方の操縦桿の使用感を簡単に尋ねた。その結果、ジョイスティック型操縦桿は、一般的に言われている通り、操作する自由度が操縦桿ではどの操作部に対応しているかわかりづらく、操作の度にその都度操作法を考えなければならず、操作が難しい、という反応であった。さらに、操作してもどの程度ロボットが運動するかわからないので、少しずつしか操作できず、迅速な操作をすることが難しい、という反応もあった。一方、Armrest Joystick では、どの被験者も操作法を理解できないこともなく、操作が簡単にできる、ということであった。しかし、被験者によっては、操縦桿の操作量に対応したロボットの運動量に若干の違和感を覚えることもあり、被験者によってロボットを操作するスケールの調整が重要となることが明らかとなった。

以上の結果から、Armrest Joystick は既存のジョイスティック型操縦桿に比べて、ロボットの遠隔操作のユーザビリティが向上することを確認した。

4.5.7 遠隔操作時のバイラテラル制御の評価実験

Armrest Joystick に搭載した力逆走型制御のロボット操作への効果を検証する実験を行った。

実験での力対称型制御の Armrest Joystick での制御ダイアグラムは先の力対称型制御で使用した制御ダイアグラムと同じ、図 4.16 に示すものである。今回は、スレーブ側で実際に計測した力およびトルク F_s を制御に組み込み、Armrest Joystick 上での出力の計算を行う。

$$\tau_s = \mathbf{K}_{pp}(\mathbf{x}_m - \mathbf{x}_s) \quad (4.7)$$

$$\tau_m = \mathbf{K}_{pf}F_s \quad (4.8)$$

実験を行う際に、アーム搭載型移動ロボット Helios IX を Armrest Joystick で力逆走型制御の機能の有無で遠隔操作を行った (図 4.35)。遠隔操作の内容は、おもりの入ったアルミ缶 (500 g) を持ち上げて別の場所まで移し替える作業とした (図 4.35)



Fig.4.35 Experiment to make the Helios IX grab the can with the weight

制御を実装するに際して、Helios IX のグリップ側のカセンサにはアクチュエータで計測される電流値を用いて、モータ定数から関節トルクを導出して、この値から手先の把持力に変換することとした。この実験では、通常の視覚からしか情報を得られない遠隔操作では、ロボット側で環境と接触した際に適切な操作が行われない場合、グリップで適切な把持力を入力できずに、アルミ缶の質量も影響して落下させてしまったり、逆に過度な力を入力してしまってグリップでアルミ缶を押し潰してしまうことが想定される。そのような環境下では接触状態の力覚を伝達するフォース・フィードバック制御によって、操縦者が適切にグリップの状況を判断して、適切な把持力によってロボットの操作が可能となると考えられるためである。Armrest Joystick のグリップ開閉操作部のバイラテラル制御の機能の有無を変化させて、それぞれ 3 回ずつ実験を行った。実験では、操作時間と HELIOS IX 側のグリップ開閉用モータのホールセンサ、電流値を計測することとした。被験者はユーザビリティ検証の実験と同じ、5 人の被験者とした。

被験者全体の操作時間の平均値を図 4.36 に、ある被験者の電流値と HELIOS IX のグ

リッパ用モータのホールセンサの計測値を図 4.37, 被験者全体のグリッパ用モータの計測値の平均値を図 4.38, 電流値の平均値を図 4.39 に示す.

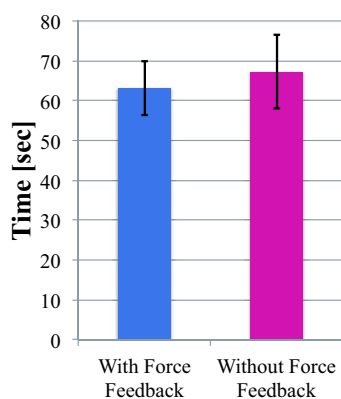


Fig.4.36 Operation time when the operators made the Helios IX grab the can with the weight

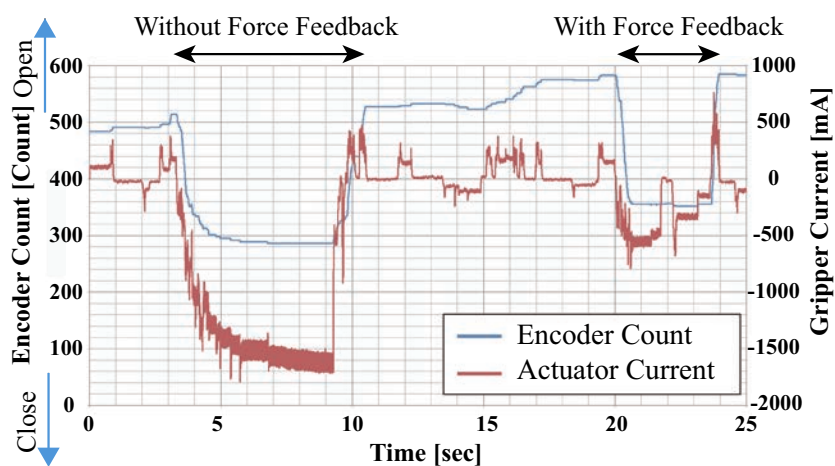


Fig.4.37 Gripper count and current of the experiment when the operators made the Helios IX grab the can with the weight

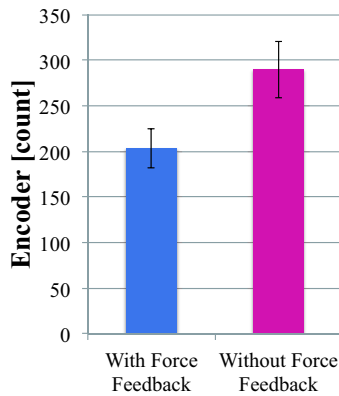


Fig.4.38 Average gripper encoder count of the experiment when the operators made the Helios IX grab the can with the weight

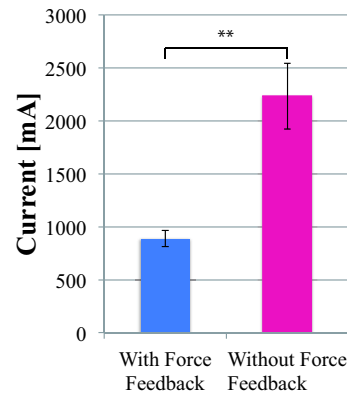


Fig.4.39 Average gripper current of the experiment when the operators made the Helios IX grab the can with the weight (** : $p < 0.01$)

フォース・フィードバック制御を実装することで、作業時間、グリッパの把持間隔と電流値（把持力）を軽減できることを確認した。特に、電流値は、フォース・フィードバック制御の実装なしの場合に比べて、その値を半分以下に軽減できる。フォース・フィードバック制御を実装しない場合に、把持力は視覚のみを使用して判断するため、缶を落下させないように必要以上に大きな把持力を入力することとなり、HELIOS IX のグリッパで強く握るような操作が必要となる。一方で、フォース・フィードバック制御を実装すると、指先で接触状態を判断することができるため、缶を押し潰さずに、持ち上げるためだけに必要な微妙な把持力を操作することができ、指先にて繊細に操作が可能となっているためと考えられる。

操作時に測定した電流値の平均値に対して、Wilcoxon の符号付き順位和検定を行った。その結果、 p 値は 0.0020 となって有意差が検出され、Armrest Joystick に搭載したバイラテラル制御によって、繊細で正確な操作が可能になっていることを確認した。

また、この実験で被験者にバイラテラル制御に関しての使用感を簡単に質問した。その結果、バイラテラル制御がない場合には被験者の視覚から作業対象が少しでも遮られると、ロボットの接触状態がわからず、操作が難しくなるという意見があった。対して、バイラテラル制御ではロボットの接触感覚が伝わって、目視だけでは分からなかった感覚によって、操作が非常に簡単にかつ安心して行えるという反応であった。しかし、被験者が感じる力に対する意見として、接触状態を十分に感じるできないというものもあり、被験者によっては力の大きさの調整を行うべきことも判明した。

以上の結果から、バイラテラル制御によってロボット操作中に操縦者が Armrest Joystick をより正確に操作でき、ユーザビリティが向上することを確認した。

4.5.8 遠隔操作時の自重補償機構の評価実験

Armrest Joystick の自重補償機構が、操縦者の筋負担とロボットの遠隔操作に与える影響を検証した。実験は、操作対象を Helios X とし、被験者は Armrest Joystick を使用して遠隔操作を行った。操作の内容は、Helios X のグリッパ先端から 15 cm 前方に Helios X の手先方向ベクトルが直交する平面上に A4 の紙面を設置し、その紙面上に 4 箇所の目標位置を設定して、Helios X のグリッパに固定した直径 1 mm のマーカーで中心を正確にマーキングする。マーキングの内容は、ランダムに指定される順番に目標の中心を 4 箇所全てマーキングする作業を課した (図 4.40)。

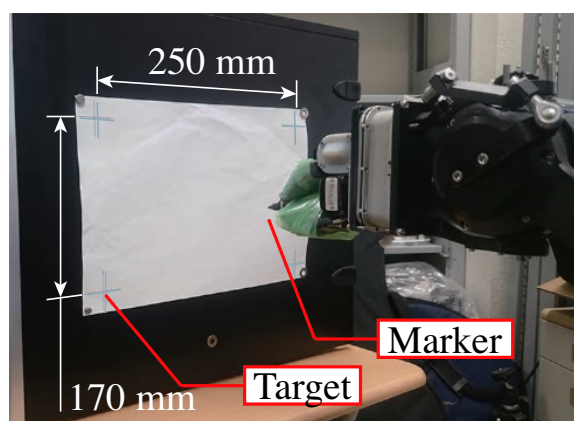


Fig.4.40 Experiment to make the Helios X mark the targets

マーキングにおける操作距離の違いは、操縦者間で一定となるように設定した。実験中、被験者と Helios X は隣接して配置され、操作状況を目視で直接確認できる状態で実験を行った。実験では目標位置とマーキング位置の距離、全てのマーキングを完了するまでにかかった時間、被験者の腕部の筋電位を測定した。なお、操作途中で操縦者の腕部が疲労によって操作が難しくなってしまった場合には、操作を中断して休憩することを許可したが、実験の時間の計測は続行した。また、目標の中心を完璧にマーキングできていない場合にも、操縦者が十分に目標位置の中心に近いと判断した場合には、次の目標のマーキング作業に移行することを許可した。これは、全目標の中心を正確にマーキングする操作を続けると、腕部の疲労によって全ての実験を完遂できない可能性が高いと考えたためである。さらに、本実験では位置操作部の自重補償機構の効果を検証するため、Armrest Joystick や Helios X の手首機構やグリッパ機構の操作ができないように制御面で制限を行った。以上の作業で評価を行うのは、位置操作部の自重補償機構のユーザビリティへの影響を検証するため、初期の検証実験では自重補償機構が機能する位置操作部のみで評価を行うことが有効であると考えたからである。また、今回は客観的指標に広く用いられている作業効率（作業時間）に加えて、被験者が自重補償の検証実験で十分に Armrest Joystick の操作に慣れたと見なして、作業精度も評価を行った。筋電位計の設定は 4.3.2

の実験で腕部に貼り付けた箇所と共通で、腕橈骨筋、上腕二頭筋、上腕三頭筋、前部三頭筋、後部三頭筋の5箇所の筋電位を表面筋電位計（BTS製：FREEEMG1000）で測定することとした。被験者は、自重補償機構の検証実験と共通とし、8名の成人男性を対象とした。一回の実験では、マーキングを4点行うことを一回の測定で課し、自重補償機構の機能の有無に対して各10回の測定を行い、その順番は被験者全体を2組に分けてカウンターバランスをとった。

本実験は、本学の人を対象とする研究倫理審査委員会の承認のもと、「ロボットアームの遠隔操縦における操縦者の疲労度が操作に与える影響の研究」（承認番号：第2015024号）として行われ、ヘルシンキ宣言の内容を遵守した。また、実験開始前に実験参加者からインフォームド・コンセントを得て行った。

まず、被験者が腕を操縦桿に載せて操作したかを検証するために、操縦桿の図4.12のジョイントの高さの変化 ΔH を計測した。

$$\Delta H = H_{max} - H \quad (4.9)$$

ΔH の実験を通しての平均値と、 ΔH の最大値の平均値を表4.7に示す。この結果から、先の実験と同様に、実験中に肘部に近いジョイントはあまり高さが変化していないことがわかる。以上から実験中の被験者は腕をアームレストに載せて操作していたものと推測される。

Table.4.7 Displacement of height at the joint when the operators made the Helios X mark the targets

	ΔH with WCM [mm]	ΔH without WCM [mm]
Average	5.01	5.19
Maximum	23.2	25.0

図4.41は各被験者の平均作業時間と全被験者間の平均、図4.42は各被験者の目標位置とマーキング位置の平均距離と全被験者間の平均、図4.43は各被験者の実験を通しての平均筋電位の全被験者間の平均である。

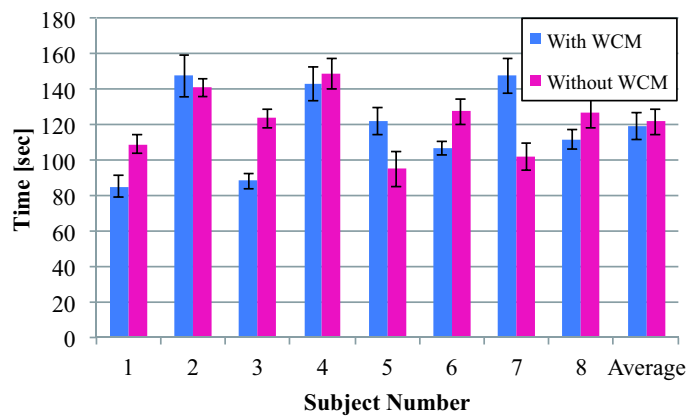


Fig.4.41 Average time of the experiment when the operators made the Helios X mark the targets

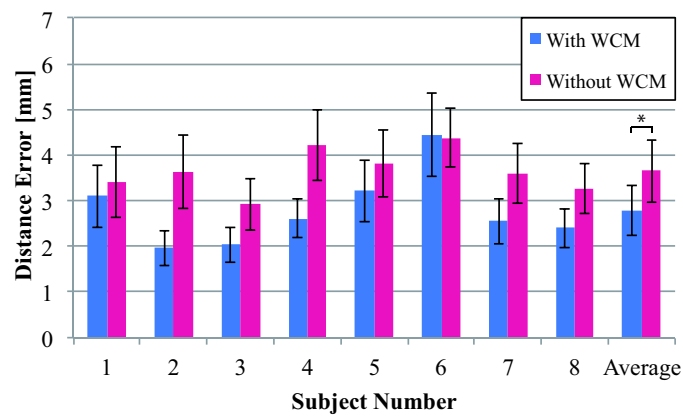


Fig.4.42 Average distance error of the experiment when the operators made the Helios X mark the targets (* : $p < 0.05$)

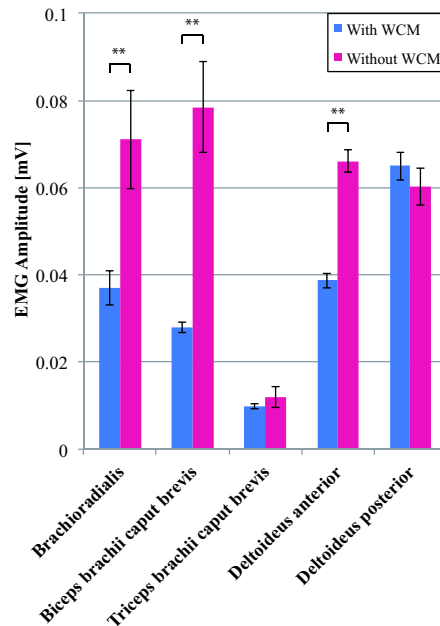


Fig.4.43 Average EMG amplitude of the experiment when the operators made the Helios X mark the targets (* : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$)

作業時間は、多くの被験者で自重補償機構を使用した場合の方が結果が短いですが、一部の被験者は自重補償機構を使用しない場合の方が作業時間が短くなっている。この理由は、自重補償機構がない場合には腕部で操縦桿質量を全て支えなければいけないため、操縦者が徐々に疲れてきて、目標位置に対して正確にマーキングできていない場合でも次の目標位置に移行して、作業終了の方を優先したためである。

マーキング精度は、一名を除いて自重補償機構を使用した場合の方が誤差が減少して、全被験者間の平均マーキング誤差は自重補償なしの場合に比べて 25 % 改善した。マーキング誤差は 3 mm 程度となっているが、操縦桿の要求仕様では最小でドアの鍵受けの直径 6 mm 程度の円内に精度よくアクセスできることが求められていることを考慮すれば、操縦桿での操作精度は要求仕様を満たしている。

腕部の筋電位は、後部三頭筋を除いて平均筋電位が軽減した。その結果は、自重補償機構の腕部への影響の実験と同様に、特に、肘の屈曲を担う腕橈骨筋と上腕二頭筋の筋電位が大きく軽減した。後部三頭筋で筋電位が若干増加した結果は、自重補償機構を実験中に頻繁に機能の有無を切り替えたことに由来する調整不足や、自重補償機構の腕部への影響の評価実験とは異なって、軽い操作力と感じて操縦者が早い速度で Armrest Joystick を動かすことができるため、機構質量の動的な効果が現れて、操縦者への負担が増えたことが要因と想定される。

また、これらの作業時間と作業精度、筋電位の計測結果に対して、表 4.8, 4.9 に示す Wilcoxon の符号付き順位和検定を行った。

Table.4.8 P-value of Wilcoxon signed-rank test for the working time and the distance error of the experiment when the operators made the Helios X mark the targets

Time	Distance Error
0.843	0.0156

Table.4.9 P-value of Wilcoxon signed-rank test for EMG amplitude of the experiment when the operators made the Helios X mark the targets

Brachioradialis	0.00781
Biceps brachii caput brevis	0.00781
Triceps brachii caput brevis	0.843
Deltoideus anterior	0.00781
Deltoideus posterior	0.460

マーキング精度や腕橈骨筋、上腕二頭筋、前部三頭筋の筋電位には、結果に有意差がみられた。筋電位に関する有意差の表出は自重補償機構の腕部への影響の実験の結果と同様となり、操作中でも操縦者の腕部の筋活動はおおよそ同じような運動を要求されていると考えられる。

また、この実験で被験者に自重補償機構に関しての使用感を簡単に質問した。その結果、自重補償機構がない場合には被験者への肉体的負担が非常に大きく、長時間操作することは非常に辛いため、ロボットの操作に対して常に不安があるという意見が聞かれた。一方で、自重補償機構を用いると、ロボットの操作は十分に軽く、思い通りの操作ができるため、操作中にほとんど操縦桿の存在を意識せずに、楽に行えるという意見であった。

以上の結果から、実際のロボットの操作でも、自重補償機構によって筋負担（特に重力逆向き方向の運動に対して）が軽減して満足度を向上し、また操作精度も向上して、ユーザビリティ向上に有効であることを確認した。

4.6 まとめ

本章では、ロボット遠隔操縦桿 Armrest Joystick に搭載した各機能の評価実験を行った。まず、Armrest Joystick の携帯性能を検証するため、操縦桿の質量、持ち運び、組立にかかる時間を計測して、操縦桿は操縦者が軽快に扱える質量 9.1 kg、設置に要する時間は 30 秒程度であり、高い携帯性を有することを明らかにした。次にバイラテラル制御による位置提示精度を検証するため、力対称型制御を実装し、位置・姿勢の指令値への追従

精度の計測結果から、操縦桿が十分な位置提示精度を有することを明らかにした。3自由度位置操作部に導入した自重補償機構について、可動範囲内で手先位置を静止させる際に要するアクチュエータ電流から手先力を算出した結果、全操縦桿重量の約95%が補償されていることを明らかにした。また、操作者の筋負担が軽減することを評価するため、腕の筋電位を計測した結果、自重補償機構により腕橈骨筋と上腕二頭筋の筋電位が優位に低下することを明らかにした。次にバイラテラル制御による力提示精度を検証するため、力逆送型制御を実装し、力・トルクの指令値への追従精度の計測結果から、操縦者が接触を判別するに十分な力提示精度を有することを明らかにした。さらにロボット操作の総合的なユーザビリティ評価を行うため、レスキューロボット Helios IX を用いて遠隔操縦による物体の置き作業実験を行い、作業時間とロボットハンド把持力の計測結果から、既存のゲームコントローラに比して高いユーザビリティを有し、バイラテラル制御の導入が有効であることを明らかにした。さらにレスキューロボット Helios X を用いてロボットアームの手先位置を制御し、指示された場所をマーキングする作業実験を行い、作業時間・マーキング誤差・操作者の筋電位を計測し、自重補償機構の導入が有効であることを明らかにした。

第 5 章

結論と今後の課題

5.1 結論

本論文では、災害現場で使用するロボットのために高いユーザビリティと現場で迅速に展開可能な携帯性を有する遠隔操縦桿が求められている背景から、これらを実現する新たなバイラテラル制御マスタ・スレーブ遠隔操縦桿の機構・制御系を提案し、試作機を開発し、実験によりその有効性を明らかにした。

まず、第 1 章では、世界中の災害とその対応の現状を紹介し、ロボットを用いること、ロボット以外にも遠隔操作技術が重要であることを述べた。遠隔操作技術の要素の一つである遠隔操縦桿は、高いユーザビリティと現場で迅速に展開可能な携帯性を有することが重要であると述べた。そして、これらを実現する新たなマスタ・スレーブ遠隔操縦桿を提案し、試作機を開発して実験によって有効性を示すことが本研究の目的であると述べた。

第 2 章では、折り畳み携帯イスに装着し、ロボットの位置・姿勢、グリッパ開閉の 7 自由度を操作可能なアームレスト付きバイラテラル制御マスタ・スレーブ遠隔操縦桿 Armrest Joystick を提案した。腕部を支えるアームレストを有し、手首位置を入力とする 3 自由度位置操作部、手首周りの回転角度を入力とする 3 自由度姿勢操作部、人差指と親指間の把持間隔を入力とする 1 自由度グリッパ開閉操作部の 3 部で構成され、7 自由度全てにフォース・フィードバックが可能で、可搬性に優れる折り畳み携帯イスに装着可能な操縦桿を提案した。また、この操縦桿は操縦者の疲労低減、広範な可動範囲と小さな操作力による高いユーザビリティ、軽量化による高い携帯性が特長であると述べた。

第 3 章では、提案する Armrest Joystick の詳細設計について述べた。3 自由度位置操作部は鉛直軸周りに回転可能な 4 節平行リンク機構により構成し、操作力を低減するために非円形プーリー・バネ系による自重補償機構を導入した。3 自由度姿勢操作部は 4 節球面パラレルリンク機構ならびにこれに保持される回転軸により構成し、シリアルリンク系との比較、特異点解析により採用した機構の優位性を明らかにした。1 自由度グリッパ開閉操作部は、人のピンチング動作の画像解析に基づき、指先に滑りを生じない外骨格型 5 節リンク機構を新たに提案し、指の角度に関わらず指先目標力を力提示可能なようにリンク長を最適化した。構成した Armrest Joystick 試作機は全質量 9.1 kg と軽量の操縦桿を実

現した。

第4章では、ロボット遠隔操縦桿 Armrest Joystick に搭載した各機能の検証実験を行った。まず、Armrest Joystick の携帯性能を検証するため、操縦桿の質量、持ち運び、組立にかかる時間を計測して、操縦桿は操縦者が軽快に扱える質量 9.1 kg、設置に要する時間は 30 秒程度であり、高い携帯性を有することを明らかにした。次にバイラテラル制御による位置提示精度を検証するため、力対称型制御を実装し、位置・姿勢の指令値への追従精度の計測結果から、操縦桿が十分な位置提示精度を有することを明らかにした。3 自由度位置操作部に導入した自重補償機構について、可動範囲内で手先位置を静止させる際に要するアクチュエータ電流から手先力を算出した結果、全操縦桿重量の約 95 % が補償されていることを明らかにした。また、操作者の筋負担が軽減することを評価するため、腕の筋電位を計測した結果、自重補償機構により腕橈骨筋と上腕二頭筋の筋電位が優位に低下することを明らかにした。次にバイラテラル制御による力提示精度を検証するため、力逆送型制御を実装し、力・トルクの指令値への追従精度の計測結果から、操縦者が接触を判別するに十分な力提示精度を有することを明らかにした。さらにロボット操作の総合的なユーザビリティ評価を行うため、災害対策用ロボット Helios IX を用いて遠隔操縦による物体の置き置き作業を行い、作業時間とロボットハンド把持力の計測結果から、既存のゲームコントローラに比して高いユーザビリティを有し、さらにバイラテラル制御の導入が有効であることを明らかにした。そしてレスキューロボット Helios X を用いてロボットアームの手先位置を制御し、指示された場所をマーキングする作業実験を行い、作業時間・マーキング誤差・操作者の筋電位を計測し、自重補償機構の導入が有効であることを明らかにした。

5.2 今後の課題

本論文では、高いユーザビリティと携帯性を有するバイラテラル制御マスタ・スレーブ遠隔操縦桿の機構・制御系を提案し、その有効性を明らかにしたが、その対象は災害現場で使用するロボットと限定的であった。現状では社会においてロボットが実用化された例はまだまだ少ないが、今後社会で活躍する場所はますます増えていくことが想定される。したがって、ロボットが様々な場所で用いられるようになった場合、使用状況に応じて要求が変化する上に、その使用者（操縦者）も今までのような専門性の高い操作技術を持った人ばかりではなく、技術を持たない人が使用することも予想される。将来的にそういった状況になった場合に、今回提案した Armrest Joystick はどこでも使用でき、かつ誰でもロボット操作が簡単に行えるため、ロボット操縦桿として非常に有効であり、様々な作業に対応することができると考えている。以上の状況で利用可能な操縦桿を将来的に実現するためには、以下の課題が考えられる。

まず、本研究では試作した操縦桿を導入してユーザビリティを向上した以外では、操作インターフェースを簡易的に構築したに過ぎない。しかし、操縦者のロボットの遠隔操作の敷居をさらに低下させるためには、操縦者がより没入しやすいインターフェースを搭載

することが必要となる。そこで、まずは Armrest Joystick に視覚提示の新たなインターフェース、特に 3D 表示が可能で頭部に搭載できるヘッドマウントディスプレイを導入し、さらに Armrest Joystick 上で頭部の状態を計測して、視覚システムを遠隔操作できるシステムに拡張することで、製作した操縦桿と合わせて相互に利用が可能で、操縦者が視覚情報も含めた遠隔操作を簡単に利用できる操縦桿に改良する必要がある。

次に、本研究ではロボットアームを 1 つ備えたロボットにおいて操縦システムを構築したが、最近では 2 台のロボットを協調して操作して作業を行うことや、ロボットアームを 2 つ以上備えたロボットで作業を行うこともあり、それらに対応した操縦システムを構築することも課題となる。そこで、Armrest Joystick では現在コントローラが右手側にしか備わっていないが、左手側にも新たに操縦桿を追加し、さらに操縦者が両手を使って操作ができるように制御システムを拡張することで、複数のアームが操作対象である場合にも簡単に運用可能な操縦桿に改良する必要がある。

さらに、本研究ではスレーブのロボットの先端の 1 自由度グリッパに操作対象を限定した操縦桿であったが、実際にはロボットアーム先端に多指ハンドやそれ以外のツールを備えたロボットも増えてきていることを考えれば、操縦桿もロボットに応じて対応していくことが必要である。現状でも、ON、OFF だけで十分使用可能なツールの場合は、現状の操縦桿構成で操作可能なシステムに拡張することで対応可能である。それ以上の操作が要求されるには、操縦桿のグリッパ開閉操作部の機構を改良して、ツールに応じて操作をしやすい形態に変更したり、多指用に幾つかの操作機構を導入して、多様な操作に対応していくこととなる。その場合に、手首操作部は現状で簡単に取外しが可能であることを考えれば、一台の操縦桿で柔軟に作業に対応可能な操縦桿を実現できる。

また、本研究で遠隔操作を行った作業は人間が普段作業する場合に近いスケールでの作業に留まっているが、ロボットの導入を期待されている場所はさらに小さいスケールから大きなスケールまで非常に幅広くなっている。このような操縦者側のスケール感覚と異なったスケールでの作業を要求された状況にも幅広く対応することも必要となる。そこで、操縦者が作業のスケールを変更する場合には同時に視覚提示情報やフォース・フィードバックのスケールも自動で変更することによって、操縦者が手間を掛けずに遠隔操作を続けることのできるシステムを構築し、そのシステムの遠隔操作時のユーザビリティ評価を行うことが必要となる。

最後に、本研究で試作した操縦桿は使用者を標準的な身体構成を持つ人物に限定した設計となっており、使用者の幅を広げた場合には操縦桿とのサイズの違いが操作に影響すると考えられる。そこで、操縦者が快適に操縦桿を使用できることを目指して、操縦者の身体構成に合わせて操縦桿の設計を最適化する手法を人間工学的観点から再考察し、それらをもとに今回の操縦桿の設計法を拡充して、その結果として製作される操縦桿を用いて操作への影響を定量的に評価していく必要がある。

付録 A

Armrest Joystick の逆運動学解析

A.1 3 自由度位置指令部の逆運動学解析

3 自由度位置指令部先端のジョイント J_5 の座標 (X_{J5}, Y_{J5}, Z_{J5}) からジョイント角 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ を計算する.

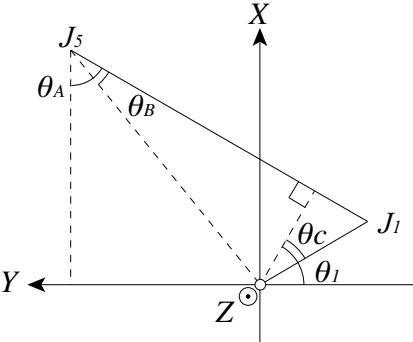


Fig.A.1 Upper view of the position controller

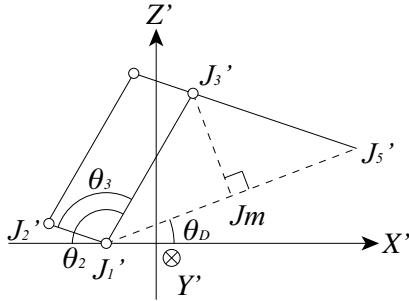


Fig.A.2 Side view of the position controller

まず、各リンクは図 A.1 の関係にあることから、ジョイント角 θ_1 は次の通りである.

$$\theta_1 = \theta_A \tag{A.1}$$

$$= \tan^{-1} \frac{Y_{J5}}{X_{J5}} + \theta_B \tag{A.2}$$

$$= \tan^{-1} \frac{X_{J5}}{Y_{J5}} + \sin^{-1} \frac{L_1 \cos \theta_C}{\sqrt{X_{J5}^2 + Y_{J5}^2}} \tag{A.3}$$

次にジョイント角 θ_2, θ_3 を求めるに際し、簡単のため、全体を Z 軸周りに $-\theta_1$ だけ回転させた $X'Y'Z'$ 座標系で考える. まず、ジョイント J_3' の座標は J_1', J_5' と常に等距離に

あることから、その関係は以下の通りである。

$$X'_{J_3} = A \cos \theta_D - B \sin \theta_D - L_1 \sin \theta_C \quad (\text{A.4})$$

$$Z'_{J_3} = A \sin \theta_D + B \sin \theta_D \quad (\text{A.5})$$

$$A = \frac{2\sqrt{(X'_{J_5} + L_1 \sin \theta_C)^2 + Z'_{J_5}{}^2}}{L_3^2 - L_5^2 + (X'_{J_5} + L_1 \sin \theta_C)^2 + Z'_{J_5}{}^2} \quad (\text{A.6})$$

$$B = \sqrt{L_3^2 - A^2} \quad (\text{A.7})$$

したがって、 J_3 の位置を利用して、パラレルリンク機構のジョイント角 θ_2, θ_3 は以下のよう求めることができる。

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{Z'_{J_3}}{X'_{J_3} + L_1 \sin \theta_C} \quad (\text{A.8})$$

$$\theta_3 = \theta_2 - \tan^{-1} \frac{Z'_{J_5} - Z'_{J_3}}{X'_{J_5} - X'_{J_3}} \quad (\text{A.9})$$

$$= \tan^{-1} \frac{Z'_{J_3}}{X'_{J_3} + L_1 \sin \theta_C} - \tan^{-1} \frac{Z'_{J_5} - Z'_{J_3}}{X'_{J_5} - X'_{J_3}} \quad (\text{A.10})$$

以上の手順によって、3 自由度位置指令部の逆運動学を解き、ジョイント角 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ を求めることができる。

A.2 3 自由度姿勢指令部の逆運動学解析

3 自由度姿勢指令部に対して、図 A.3 に示すように座標系を設定する。

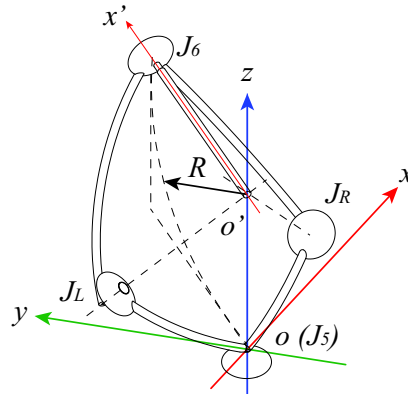


Fig.A.3 Coordination system of the posture controller

姿勢行列 \mathbf{T}_s と各回転行列 \mathbf{T}_{Roll} , \mathbf{T}_{Pitch} , \mathbf{T}_{Yaw} の関係は次の通りとなる。

$$\mathbf{T}_s = \mathbf{T}_{Roll} \mathbf{T}_{Pitch} \mathbf{T}_{Yaw} \quad (\text{A.11})$$

姿勢行列 \mathbf{T}_s からジョイント J_6 の座標 $(X_{J_6}, Y_{J_6}, Z_{J_6})$ を計算する。z 軸から全体を眺めると、リンク $J_L J_5, J_R J_5$ のなす角 θ_4, θ_5 の 2 等分線上に常にジョイント J_6 があることから、次の関係式を導くことができる。

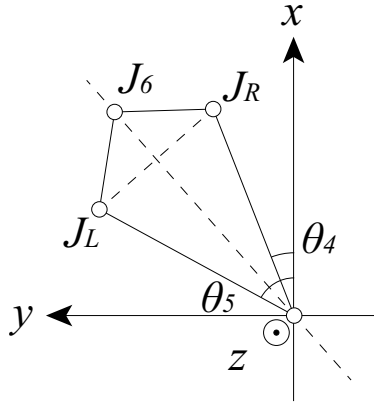


Fig.A.4 Upper view of the posture controller

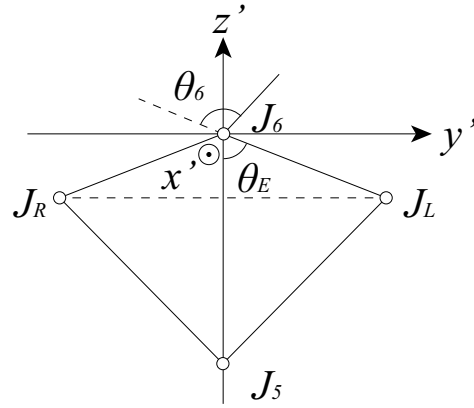


Fig.A.5 Front view of the posture controller

$$\frac{\theta_4 + \theta_5}{2} = \tan^{-1} \frac{Y_{J6}}{X_{J6}} \quad (\text{A.12})$$

次にジョイント J_L, J_R の座標 $(X_{JL}, Y_{JL}, Z_{JL}), (X_{JR}, Y_{JR}, Z_{JR})$ を求める. 全体を z 軸周りに $-\frac{\theta_4 + \theta_5}{2}$ 回転させるとジョイント J'_6 を常に x 軸上に固定して考えることができる. ジョイント J'_L, J'_R はジョイント J_5, J'_6 からそれぞれ L_6, L_7 の距離にあることから, 求めるジョイントは $z' = L_{6V}$ となるため以下の式が成立する.

$$(x - X_{J'_6})^2 + y^2 + (z - Z_{J'_6})^2 = L_7^2 \quad (\text{A.13})$$

$$x^2 + y^2 + z^2 = L_6^2 \quad (\text{A.14})$$

$$z = L_{6V} \quad (\text{A.15})$$

以上の 3 式からジョイント J'_L, J'_R の座標はそれぞれ次の通りである.

$$\begin{aligned} & (X_{J'_R}, Y_{J'_R}, Z_{J'_R}) \\ &= \left(\frac{L_6^2 - L_7^2 + X_{J'_6}^2 + Z_{J'_6}^2 - 2L_{6V}Z_{J'_6}}{2X_{J'_6}}, -\sqrt{L_{6H}^2 - X_{J'_R}^2}, L_{6V} \right) \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

$$\begin{aligned} & (X_{J'_L}, Y_{J'_L}, Z_{J'_L}) \\ &= \left(\frac{L_6^2 - L_7^2 + X_{J'_6}^2 + Z_{J'_6}^2 - 2L_{6V}Z_{J'_6}}{2X_{J'_6}}, \sqrt{L_{6H}^2 - X_{J'_L}^2}, L_{6V} \right) \end{aligned} \quad (\text{A.17})$$

また, z' 軸から全体を眺めると, リンク $J_L J_5, J_R J_5$ と x' 軸がなす角とジョイント J'_L, J'_R の関係を次の通り記すことができる.

$$\frac{-\theta_4 + \theta_5}{2} = \cos^{-1} \frac{X_{J'_6}}{L_{6H}} \quad (\text{A.18})$$

したがって, ジョイント角 θ_4, θ_5 を計算すると次の通りである.

$$\theta_4 = \tan^{-1} \frac{Y_{J6}}{X_{J6}} - \cos^{-1} \frac{X_{J'_6}}{L_{6H}} \quad (\text{A.19})$$

$$\theta_5 = \tan^{-1} \frac{Y_{J6}}{X_{J6}} + \cos^{-1} \frac{X_{J'_6}}{L_{6H}} \quad (\text{A.20})$$

この結果を元にピッチ角 θ_{pitch} , ヨー角 θ_{yaw} をそれぞれ計算する.

$$\theta_{pitch} = \tan^{-1} \frac{X_{J'6}}{Z_{J6} - R} \quad (\text{A.21})$$

$$\theta_{yaw} = \frac{-\theta_4 + \theta_5}{2} \quad (\text{A.22})$$

次にピッチ角 θ_{pitch} , ヨー角 θ_{yaw} から回転行列 \mathbf{T}_{Roll} を求めることで, ロール角 θ_{roll} が求まる. また, リンク $J_L J_6, J_R J_6$ がなす角は図 A.5 の関係から求まるため, ジョイント角 θ_6 は次の通りである.

$$\theta_6 = \theta_{roll} + \theta_E \quad (\text{A.23})$$

$$= \theta_{roll} + \sin^{-1} \left(\frac{L_{2H}}{L_{1H} \sin \frac{\theta_5 - \theta_4}{2}} \right) \quad (\text{A.24})$$

以上の手順によって, 3 自由度姿勢指令部の逆運動学を解き, ジョイント角 $\theta_4, \theta_5, \theta_6$ を求めることができる.

参考文献

- [1] 国際連合広報センター, ウィーン宣言及び行動計画 (online), available from <http://www.unic.or.jp/files/Vienna.pdf>, 参照日 2016 年 1 月 11 日.
- [2] 神戸新聞, 阪神・淡路大震災 (online), available from <http://www.kobe-np.co.jp/rentoku/sinsai/>, 参照日 2012 年 1 月 21 日.
- [3] 福島県庁, 東日本大震災関連情報ページ一覧 (online), available from <https://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/01010d/shinsai-joho.html>, 参照日 2012 年 1 月 21 日.
- [4] 東京電力, 廃炉プロジェクト (online), available from <http://www.tepco.co.jp/decommision/index-j.html>, 参照日 2013 年 8 月 20 日.
- [5] The National Commission on Terrorist Attacks Upon the United States (online), available from <http://www.9-11commission.gov/>, 参照日 2012 年 1 月 21 日.
- [6] 警視庁, 焦点 (online), available from <https://www.npa.go.jp/archive/keibi/syouten/syouten260/it0.htm>, 参照日 2012 年 1 月 21 日.
- [7] 長有紀枝, 地雷問題ハンドブック, 自由国民社, 1997.
- [8] 下井信浩, 地雷撲滅をめざす技術, 森北出版, 2002.
- [9] Landmine Monitor (online), available from <http://lm.icbl.org/lm/2009/>, 参照日 2010 年 4 月 15 日.
- [10] DARPA Robotics Challenge (online), available from <http://www.theroboticschallenge.org/overview>, 参照日 2013 年 12 月 20 日.
- [11] 厚生労働省, 東京電力福島第一原子力発電所における緊急作業従事者等の長期的健康管理 (online), available from <http://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/koyouroudou/roudoukijun/anzen/fukushima/index.html>, 参照日 2016 年 1 月 10 日.
- [12] 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 災害対応ロボット開発の最新成果を初公開 (online), available from <http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5-100156.html>, 参照日 2016 年 1 月 5 日.
- [13] 東京電力, 報道関係資料 (online), available from <http://www.tepco.co.jp/decommision/news/handouts/index-j.html>, 参照日 2016 年 1 月 5 日.

- [14] NHK, 東電福島第一原発 廃炉作業に初めて密着 (online), available from [〈http://www9.nhk.or.jp/nw9/marugoto/2015/03/0324.html〉](http://www9.nhk.or.jp/nw9/marugoto/2015/03/0324.html), 参照日 2016 年 1 月 8 日.
- [15] 東京電力, ロボット技術の活用 (online), available from [〈http://www.tepco.co.jp/decommission/principles/technology/robot/index-j.html〉](http://www.tepco.co.jp/decommission/principles/technology/robot/index-j.html), 参照日 2016 年 1 月 7 日.
- [16] Boston Dynamics, Big Dog (online), available from [〈http://www.bostondynamics.com/robot-bigdog.html〉](http://www.bostondynamics.com/robot-bigdog.html), 参照日 2016 年 1 月 18 日.
- [17] Mini-Surveyor Consortium (online), available from [〈http://www.mini-surveyor.com/〉](http://www.mini-surveyor.com/), 参照日 2016 年 1 月 18 日.
- [18] 国土交通省, 次世代社会インフラ用ロボット開発・導入 (online), available from [〈http://www.mlit.go.jp/common/001107337.pdf〉](http://www.mlit.go.jp/common/001107337.pdf), 参照日 2016 年 1 月 18 日.
- [19] 科学技術振興機構, 日米研究者による震災救助活動 (online), available from [〈http://www.jst.go.jp/inter/result/ex/us01.html〉](http://www.jst.go.jp/inter/result/ex/us01.html), 参照日 2016 年 1 月 18 日.
- [20] Boston Dynamics, Atlas (online), available from [〈http://www.bostondynamics.com/robot-Atlas.html〉](http://www.bostondynamics.com/robot-Atlas.html), 参照日 2016 年 1 月 18 日.
- [21] Japan Virtual Robotics Challenge, Atlas (online), available from [〈https://jvrc.org/team.html〉](https://jvrc.org/team.html), 参照日 2016 年 1 月 18 日.
- [22] 防衛省, 技術研究所 (online), available from [〈http://www.mod.go.jp/trdi/research/center.html〉](http://www.mod.go.jp/trdi/research/center.html), 参照日 2016 年 1 月 18 日.
- [23] 三菱重工業, 原子力災害対応のパワーアシストスーツ (PAS) を開発 (online), available from [〈http://www.mhi.co.jp/news/story/1512015706.html〉](http://www.mhi.co.jp/news/story/1512015706.html), 参照日 2016 年 1 月 19 日.
- [24] 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 災害対応無人化システム研究開発 (online), available from [〈http://www.nedo.go.jp/robot/project/projectunmannedrobot.html〉](http://www.nedo.go.jp/robot/project/projectunmannedrobot.html), 参照日 2015 年 8 月 20 日.
- [25] 本田技研工業, 高所調査用ロボット (online), available from [〈http://www.honda.co.jp/robotics/high-access-survey-robot/〉](http://www.honda.co.jp/robotics/high-access-survey-robot/), 参照日 2015 年 8 月 20 日.
- [26] 平井成興, Shared Autonomy の理論, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.6 (1993), pp.20-25.
- [27] 新版ロボット工学ハンドブック編集委員会, 新版ロボット工学ハンドブック, 日本ロボット学会, 2005.
- [28] Manuel Ferre, Martin Buss, Rafael Aracil, Claudio Melchiorri and Carlos Bal-

- aguer, *Advances in Telerobotics*, Springer, 2007.
- [29] 教育機器編集委員会編, 産業教育機器システム便覧, 日科技連出版社, 1972.
- [30] 館すすむ (すすむは日に章), 小森谷清, 澤田一哉, 井床利之, 井上幸三, HRP 遠隔操作プラットフォーム, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.1 (2001), pp.16-27.
- [31] 古屋弘, 栗生暢雄, 清水千春, 3D画像と体感型操縦を用いた「次世代無人化施工システム」, 大林組技術研究所報, No.76 (2012), pp.1-10.
- [32] Koji Ueda, Michele Guarnieri, Tadao Inoh, Paulo Debenest, Ryuichi Hodoshima, E. Fumihiko Fukushima and Shigeo Hirose, Development of Helios IX : an arm-equipped tracked vehicle, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.23, No.6 (2011), pp.1031-1040.
- [33] Masayuki Arai, Yoshinori Tanaka, Shigeo Hirose, Hiroyuki Kuwahara and Shingo Tsukui, Improved driving mechanism for connected crawler vehicle Souryu-IV for in rubble searching operations, *Journal of Field Robotics*, Vol.25, No.1 (2008), pp.31-65.
- [34] 館すすむ (すすむは日に章), 佐藤誠, 廣瀬通孝, 日本バーチャルリアリティ学会編: バーチャルリアリティ学, コロナ社, 2011.
- [35] 永井康史, 木村真一, 土屋茂, 飯田尚志, 聴覚を利用した宇宙ロボットのテレオペレーションシステム, ロボテックス・メカトロニクス講演会予稿集, No.99 (1999), 1P2-06-047.
- [36] 館すすむ (すすむは日に章), 南澤孝太, 古川正紘, 佐藤克成, テレイグジスタンスの研究 (第 65 報) -Telesar5:触覚を伝えるテレイグジスタンスロボットシステム-, エンタテイメントコンピューティング 2011, (2011), 02A-01.
- [37] 国土交通省, 建設機械に関する技術方針.
- [38] 経済産業省, 次世代ロボット安全性確保ガイドライン.
- [39] 小田光茂, 衛星搭載ロボットアームの遠隔操作模擬実験 通信時間遅れや通信容量制約等の環境を模擬した実験, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.4 (1997), pp.581-589.
- [40] iRobot, 510 PackBot (online), available from <http://www.irobot.com/For-Defense-and-Security/Robots/510-PackBot.aspx>, 参照日 2011 年 12 月 15 日.
- [41] 八塚尚, 原子力発電所対応遠隔無線式小型双腕重機 “ASTACO-SoRa” のヒューマンインタフェース, 日本ロボット学会誌, Vol.33, No.6 (2015), pp.404-407.
- [42] Microsoft (online), available from <https://www.microsoft.com/en-us/>, 参照日 2015 年 11 月 13 日.
- [43] Intuitive Surgical(online), available from <http://www.intuitivesurgical.com/>, 参照日 2012 年 3 月 12 日.
- [44] オリンパス, 高機能手術支援ロボットの実用化に向けた取り組みが着実に進展 (online), available from <http://www.olympus.co.jp/jp/news/2012b/nr120911nedoj.jsp>, 参照日 2013 年 6 月 4 日.
- [45] オリンパス, ロボット技術を用いた 2 つの治療支援機器を開発 (online), available

- from <http://www.olympus.co.jp/jp/news/2015a/nr150603roboticsj.jsp>, 参照日 2015 年 6 月 10 日.
- [46] 米倉健太, 中岡慎一郎, 横井一仁, 人の全身姿勢からヒューマノイドの全身姿勢を入力するインタフェースの開発 (その 1), ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, (2011), 2P2-J12.
- [47] 日原聖人, 石川貴史, 高橋知之, 水戸部和久, 妻木勇一, Kinect を用いたウェアラブルミニチュアヒューマノイドロボットの操作インタフェース, 計測自動制御学会東北支部第 283 回研究集会, (2013), 283-12.
- [48] Bhabha Atomic Research Centre (online), available from <http://www.barc.gov.in/>, 参照日 2011 年 6 月 4 日.
- [49] DE-STA-CO (online), available from <http://www.destaco.com/crl-products-equipment.html>, 参照日 2011 年 6 月 4 日.
- [50] Naota Furihata, Shigeo Hirose, Development of mine hands : Extended prodder for protected demining operation, *Autonomus Robots*, Vol.18, (2005), pp.337-350.
- [51] 尹祐根, 御所園敏彦, 川辺洋, 木南匡敬, 妻木勇一, 内山勝, 小田光茂, 土井利次, 技術試験衛星 VII 型 (ETS-VII) 搭載ロボットアームの遠隔操作実験, 計測自動制御学会, No.185, (1999), 185-5.
- [52] Shinichi Suganuma, Masaru Ogata, Kensuke Takita and Shigeo Hirose, Development of detachable tele-operation gripper for the walking robot, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol.3, (2003), pp.3390-3395.
- [53] Kraft Telerobotics (online), available from <http://krafttelerobotics.com/>, 参照日 2011 年 4 月 10 日.
- [54] 中嶋勝己, 家中良太, 藤森潤, 加賀谷博昭, 森山尚, 蓮沼仁志, 久保田哲也, 志子田繁一, 可搬型遠隔制御装置の開発 (HRP 代行運転分野), 日本ロボット学会学術講演会予稿集, Vol.20, (2002), 2D16.
- [55] Sho Ito, Yasuyoshi Yokokohji, Maneuverability of master control devices considering the musculo-skeletal model of an operator, *Third Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, Vol.3, (2009), pp.57-62.
- [56] 渡邊孝一, 川上直樹, 舘すすむ (すすむは日に章), 6 自由度ヘッド及び空圧アームを有するロボットを用いたマスタスレーブシステムの構築 テレイグジスタンスの研究 第 60 報, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, (2009), 2A3-3.
- [57] JIS8530 : 2000, 人間工学—インタラクティブシステムの間人中心設計プロセス.
- [58] 日本原子力発電, 原子力緊急事態支援センター解説の経緯及び役割 (online), available from <http://www.japc.co.jp/emergency-support/index.html>, 参照日 2016 年 1 月 5 日.

- [59] 東京電力, その他関連資料 (online), available from <http://www.tepco.co.jp/decommission/news/past-progress/index-j.html>, 参照日 2015 年 8 月 20 日.
- [60] Andre Schiele, Gianfranco Visentin, The ESA human arm exoskeleton for space robotics telepresence, International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, (2003) .
- [61] Dongseok Ryu, Kyoungwon Moon, Sungchul Kang, Munsang Kim, Jae-Bok Song, Development of wearable haptic system for tangible studio experience a virtual heritage alive, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (2006), pp.466-471.
- [62] DFKI, Active exoskeleton (online), available from <http://robotik.dfki-bremen.de/en/research/robot-systems/exoskeleton-active.html>, 参照日 2011 年 6 月 4 日.
- [63] Angelika Peer, Yuta Komoguchi and Martin Buss, Towards a mobile haptic interface for bimanual manipulations, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (2007), pp.384-391 .
- [64] 石井啓範, 藤島一雄, 富田邦嗣, 作業機械の操作装置, 特許, 公開, 日立建機株式会社, 2005/3/11, 特願 2005-068437, 2006/09/21, 特開 2006-252224.
- [65] Ryuichi Hodoshima, Koji Ueda, Hiroaki Ishida, Michele Guarnieri, Edwardo F. Fukushima and Shigeo Hirose, Telerobotic control system to enhance rescue operations for arm-equipped tracked vehicle HELIOS IX, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.26, No.1 (2014), pp.17-33.
- [66] 野田幸矢, 上田紘司, 伊能崇雄, 広瀬茂男, 移動ロボット搭載用多関節アーム ZAHN の開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会, Vol.25, (2013), 1A1-R12.
- [67] Thomas Massie and Kenneth Salisbury, The PHANToM Haptic Interface : A device for probing virtual object, Dynamic Systems and Control, Vol.55, No.1 (1994) .
- [68] 小西良, 吉田明, 山本佳男, 川上辰男, 石川友彦, ハプティックデバイスを用いた微細作業の操作性向上, ロボティクス・メカトロニクス講演会, (2002), 1A1-I05.
- [69] 青木孝文, 三武裕玄, 長谷川晶一, 佐藤誠, ワイヤによる皮膚感覚刺激を用いた指先装着型接触感提示デバイス, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.14, No.3 (2009).
- [70] Gregory Tholey, Jaydev P. Desai, Design and development of a general purpose 7 DOF haptic device, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems 2006, Vol.24, (2006), pp.95-101.
- [71] 武居直行, 省エネ・安全のための重力補償機構, 日本ロボット学会誌, Vol.29, No.6 (2011), pp.508-511.
- [72] 広瀬茂男, 生田幸士, 佐藤光一, 形状記憶合金アクチュエータの開発 (σ 機構の導入

- による出力特性の改善), 日本ロボット学会誌, Vol.4, No.6 (1986), pp.28-38.
- [73] 遠藤玄, 山田浩也, 矢島明, 尾形勝, 広瀬茂男, 非円形プーリーバネ系による自重補償機構と4節平行リンク型アームへの適応, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.1 (2010), pp.77-84.
- [74] Stefano Galvan, Andrea Castellani, Debora Botturi and Paolo Fiorini, Advanced teleoperation architecture, International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol.19, (2006), pp.1680-1685.
- [75] Antonio Frisoli, Fabrizio Rocchi, Simone Marcheschi, Andrea Dettori and Fabio Salsedo, Massimo Bergamasco, A new force-feedback arm exoskeleton for haptic interaction in virtual environments, Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Vol.1, (2005), pp.195-201.
- [76] 荒田純平, 近藤寛之, 坂口正道, 藤本英雄, パラレルリンク機構を用いた力覚提示装置 DELTA-4 の開発, 日本ロボット学会誌, Vol.27, No.8 (2009), pp.917-925.
- [77] Koji Ueda., Hiroya Yamada, Hiroaki Ishida and Shigeo Hirose, Design of large motion range and heavy duty 2-DoF spherical parallel wrist mechanism, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.25, No.2 (2013), pp.294-305.
- [78] 加藤恵輔, 広瀬茂男, 形状帰還型マスタ・スレーブアームの提案と基礎実験 (人道的地雷撤去ロボットへの適用可能性の検討), 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.5 (2000), pp.752-757.
- [79] Thomas Hulin, Mikel Sagardia, Jordi Artigas, Simon Schaezle, Philipp Kremer and Carsten Preusche, Human-scale bimanual haptic interface, International Conference on Enactive Interfaces, Vol.5 (2008), pp.28-33.
- [80] CyberGlove Systems LLC (online), available from <http://www.cyberglovesystems.com/>, 参照日 2011 年 5 月 3 日.
- [81] Antonio Frisoli, Francesco Simoncini and Massimo Bergamasco, Mechanical design of a haptic interface for the hand, ASME 2002 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Vol.5, (2002), pp.775-782.
- [82] AIST 人体寸法データベース 1991-92 (online), available from <http://riodb.ibase.aist.go.jp/dhbodydb/91-92/>, 参照日 2011 年 5 月 13 日.
- [83] Hibot Corporation (online), available from <http://www.hibot.co.jp/top.php>, 参照日 2010 年 8 月 10 日.
- [84] Hisami Nakano and Shigeo Hirose, Crank-wheel : A brand new mobile base for field robots, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems Oct, Vol.25, (2012), pp.4608-4613.
- [85] 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, Vol.24, (2012), 1P1-C09.

-
- [86] Nintendo Co., Ltd (online), available from <http://www.nintendo.co.jp/>, 参照日 2012 年 3 月 10 日.
- [87] 山田宏尚, 加藤英寿, 土井達也, 力覚提示機能を有する遠隔操作建設ロボットシステムの操作性評価: カメラ映像による遠隔操作ロボットシステムに力覚提示機能を備えた場合の操作性評価, 日本機械学会論文集. C 編, vol.73, No.735 (2007), pp.3055-3062.
- [88] Gj Raju, George Verghese, Thomas Sheridan, Design issues in 2-port network models of bilateral remote manipulation, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.3, (1989), pp.1316-1321.
- [89] 松浦譲, 荒木一雄, 陳沢林, 運転者の生体反応による操縦感覚評価の研究 ドライビングシミュレータによる運転者の生体反応について, 自動車技術会学術講演会前刷集, Vol.2, (1992), pp.9-12.

業績一覧

印刷論文

1. Ryuichi Hodoshima, Koji Ueda, Hiroaki Ishida, Michele Guarnieri, Edwardo F. Fukushima and Shigeo Hirose, Telerobotic Control System to Enhance Rescue Operations for Arm-Equipped Tracked Vehicle HELIOS IX, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.26, No.1 (2014), pp.17-33.
2. 石田悠朗, 広瀬茂男, 萩原哲夫, 福島 E. 文彦, 遠藤玄, 力補償型バイラテラルマスターム Armrest Joystick の開発 (力補償可能な機構系の設計), 日本機械学会論文集, No.15-00562 (2016), DOI:10.1299/transjsme.15-00562.

査読付き国際学会

1. Hiroaki Ishida, Tetsuo Hagiwara, Koji Ueda and Shigeo Hirose, Armrest Joystick -Mechanism design and basic experiments-, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol.25 (2012), pp.5119-5124.
2. Hiroaki Ishida, Shigeo Hirose, Tetsuo Hagiwara, Koji Ueda and Gen Endo, Development of robot remote controller “Armrest Joystick” -Study of bilateral remote control-, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, (2015) .

その他の口頭発表

1. 石田悠朗, 萩原哲夫, 広瀬茂男, アームレストジョイスティックの開発 -基本構成の提案と設計-, 日本ロボット学会学術講演会, Vo.29, (2011), 202-6.
2. 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, (2012), 2A1-P08.
3. 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, 日本ロボット学会学術講演会, 日本ロボット学会, Vol.30 (2012), 2A3-3.

4. 石田悠朗, 広瀬茂男, 突起の指先押付けによる力感覚鋭敏化に関する研究 -実験条件に関する基本的検討-, ロボティクス・メカトロニクス講演会, (2013), 2A2-A06.
5. 上田紘司, 山田浩也, 石田悠朗, 広瀬茂男, 2自由度球面リンク機構の可動範囲最大化に関する検討, ロボティクス・メカトロニクス講演会, (2013), 2A2-K03.

表彰

1. Hiroaki Ishida, Tetsuo Hagiwara, Koji Ueda and Shigeo Hirose, JTCTF Novel Technology Paper Award for Amusement Culture Finalist, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2012.

本論文に関係しない業績

1. 石田悠朗, 雨宮清, 福島 E. 文彦, 広瀬茂男, 大型地雷処理車両に着脱可能とする対戦車地雷探査用アームの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会, (2011), 1A2-Q02.
2. Koji Ueda, Hiroya Yamada, Hiroaki Ishida and Shigeo Hirose, Design of large motion range and heavy duty 2-DoF spherical parallel wrist mechanism, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.25, No.2 (2013), pp.294-305.

特許

1. 広瀬茂男, 石田悠朗, 萩原哲夫, 肘掛型遠隔操縦装置, 特許, 公開, 国立大学法人東京工業大学, 2011/10/13, 特願 2011-225780, 2013/05/13, 特開 2013-088852, 2013.
2. 広瀬茂男, 石田悠朗, 遠隔操縦装置, 特許, 公開, 国立大学法人東京工業大学, 2011/08/31, 特願 2011-189163, 2013/03/14, 特開 2013-049121, 2013.
3. 広瀬茂男, 石田悠朗, 山岸健, 掛智一, 外川圭司, インターフェース装置, 特許, 公開, 国立大学法人東京工業大学, Sony Computer Entertainment Inc., 2013/08/02, 特願 2013-071069, 2015/05/02, 特開 2015-015651, 2015.

謝辞

当研究を進めるに於いて研究を行う環境を整えてくださると同時に、多大なるご指導をしてくださった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 遠藤玄准教授、東京工科大学大学院 メディアサイエンス専攻 福島 E. 文彦教授、株式会社 ハイボット 会長 広瀬茂男氏 に感謝申し上げます。また、本論文の審査をしていただき、当研究へのご助言をくださった東京工業大学 機械宇宙システム専攻 小田光茂教授、鈴木康一教授、機械物理工学専攻 菅原雄介准教授、葭田貴子准教授に感謝申し上げます。また、当研究に留まらず、様々なご助言をしていただいた難波江裕之助教に加え、株式会社 横浜 KH 技研 萩原哲夫氏、株式会社 東芝 上田紘司氏、株式会社 ハイボット 山田浩也氏を始め、小俣・高山研究室 野田幸矢氏にも大変感謝しております。

そして、研究室生活を送る上で研究室所属時からお世話になった塚越研究室 小松洋音氏を始め、D 部屋で一緒に過ごした Arturo Ceron 君、Jose Antonio Silva Rico 君、北野智士君、堀米篤史君ほか、修士、学部の学生にも感謝しております。

最後に研究生生活を支え、暖かく見守ってくださいました家族に感謝いたします。