

- 修士論文 -

アクティブサスペンションを有する
惑星探査ローバの不整地走破性能に関する研究

平成22年2月9日

指導教員：久保田 孝 教授

東京大学大学院 工学系研究科 電気系工学専攻

086503 内木 孝将

内容梗概

現在の惑星探査ローバミッションでは、様々な地形での走破が要求されており、不整地走破性能が高いアクティブサスペンションを用いたローバが注目されている。しかし、現在研究されているアクティブサスペンションを用いたローバは、いずれもエネルギー効率や不整地走破性能といった点に問題がある。

そこで本研究では、エネルギー効率や簡素性を高めるために、最低限のモータ数でアクティブサスペンションを実現し、かつ高い不整地走破性を持つローバを提案する。そして、不整地走破性能の指標に基づいたアクティブサスペンションの制御を行い、シミュレーションを通して考察を行う。

Abstract

In planetary missions, a rover which can traverse over rough terrain is required. Rovers which have wheeled locomotive system are used broadly in planetary missions, because wheeled locomotive system has low energy consumption and its configuration is simpler than other types of locomotive system, such as tracked locomotive system. However, The wheeled robots have has low traversability. In order to address this problem, various methods have been proposed. For example, the rocker bogie suspension is one of the most well-known methods to improve in traversability. Sojourner and MER have rocker-bogie suspension and had worked successfully on Mars. To traverse over more challenging terrain, however it is not enough to use only passive suspension. Recently, several rovers with active suspension have been developed.

In this paper, the authors propose a new rover with active suspension which has high efficiency and high traversability. Second, the authors propose a method to control the active suspension system to improve traversability.

Finally, through simulation, the authors show the effectiveness in the ability of climbing slopes and stability from tip over when traversing various rough terrain using active suspension.

目次

第1章	序論	4
1.1	研究の背景	4
1.1.1	惑星探査の目的	4
1.1.2	これまでの惑星探査	5
1.2	惑星探査ローバの移動機構	6
1.2.1	ロボットの移動機構	6
1.2.2	惑星探査ローバと地上ロボットの違い	7
1.2.3	従来の惑星探査ローバの移動機構	8
1.2.4	パッシブなサスペンションを用いた惑星探査ローバの問題点	10
1.3	本研究の目的	11
1.4	本論文の構成	11
第2章	アクティブサスペンションを有する惑星探査ローバ	12
2.1	従来のアクティブサスペンションを用いた惑星探査ローバ	12
2.2	提案する惑星探査ローバ	14
第3章	不整地走破性能を表す指標の定義	15
3.1	不整地走破性能の一般的な定義	15
3.2	路面粘着性の指標の定義	16
3.3	転倒安定性の指標の定義	17
第4章	不整地走破性能の数値解析	19
4.1	ローバの数学モデル	19
4.2	各不整地走破性能を表す指標の導出	21
4.2.1	各車輪の接地点の座標の導出	21
4.2.2	路面粘着性の導出	23
4.2.3	安定余裕角の導出	24
4.3	接地荷重による不整地走破性能の変化	25
4.3.1	ノミナル姿勢の定義	25
4.3.2	提案するローバの登坂モデル	25
4.3.3	接地荷重による不整地走破性能の変化	27
第5章	不整地走破性能を高めるアクティブサスペンションの制御	31
5.1	アクティブサス制御の考え方	31
5.1.1	アクティブサス制御の考え方（ロール方向）	31
5.1.2	アクティブサス制御の考え方（ピッチ方向）	32
5.2	アクティブサスの制御法（ノミナルの状態では走破不可能の領域）	33

5.2.1	ロール方向の制御	34
5.2.2	ピッチ方向の制御	34
5.3	シミュレーション検討（ノミナルの状態では走破不可能の領域）	36
5.3.1	地形とローバの姿勢との関係	36
5.3.2	シミュレーション条件（ノミナルの状態では走破不可能の領域）	38
5.3.3	シミュレーション結果（ノミナルの状態では走破不可能の領域）	38
5.4	アクティブサスの制御法（ノミナルの状態では走破可能の領域）	41
5.4.1	シミュレーション結果（ノミナルの状態では走破可能の領域）	43
5.5	アクティブサスの制御アルゴリズム	45
5.6	ダイナミクスを考慮したシミュレーション	45
5.6.1	シミュレーション結果（ダイナミクスを考慮したシミュレーション）	46
第 6 章	結論	48
6.1	研究の成果	48
6.2	今後の課題	48
	参考文献	49
	謝 辞	52
付 録 A	NASA AMES academy	54
A.1	Background	54
A.1.1	The purpose of this research	55
A.2	Experiments and results	55
A.2.1	Experiments and results	55
A.2.2	Comparison of ElsieA, ElsieB and BesiA by counting attention points	56
A.2.3	Comparing ElsieA, ElsieB and BesiA by using a transition map	57
A.2.4	Comparing transition map within each configuration	59
A.3	Making eye movement model	62
A.4	Conclusion and future works	62
A.4.1	Conclusion	62
A.4.2	Future works	62
A.4.3	Comments	62

目 次

1.1	The man on the moon [1]	4
1.2	NASA rover for Mars "Sojourner" [3]	6
1.3	NASA rover for Mars "MER" [5]	6
1.4	ISAS rover for Itokawa "MINERVA" [6]	6
1.5	Various locomotion systems[8][10][14]	7
1.6	Rocky bogie suspension[28]	9
1.7	PEGASUS system [19]	9
1.8	Shrimp system[19]	9
1.9	CRAB2 system[19]	9
1.10	The model of NASA rover "MER2 stuck in martian sand [29]	10
2.1	NASA rover "Chariot"[30]	13
2.2	NASA rover "ATHLETE"[31]	13
2.3	CMU rover "Scarab"[32]	13
2.4	NASA rover "SRR"[33]	13
2.5	ESA rover for Mars "RCL-E"[34]	13
2.6	NASA rover "Rocky7"[35]	14
2.7	Active suspension	14
2.8	Proposed rover model	14
3.1	load of each wheel	16
3.2	Stability margin and static stability angle	18
3.3	Stability margin and energy stability margin	18
4.1	Proposed rover's parameter 1	20
4.2	Proposed rover's parameter 2	20
4.3	Proposed rover model 2	24
4.4	Calculation for static stability angle	24
4.5	Proposed rover (Nominal)	25
4.6	The model of rover climbing a slope	26
4.7	The model of rover climbing a slope 2	29
4.8	The difference of max power of each wheel by changing slope angle	29
4.9	The difference of max power of each wheel and limited torque by changing slope angle	30
4.10	The difference of climbing slope ability between natural contact weight and average contact weight with limited torque	30

5.1	Control method for active suspension (roll)	32
5.2	Control method for active suspension (pitch)	32
5.3	Algorism for control of active suspension in the area which the rover can't traverse	33
5.4	Control by active suspension (roll)	34
5.5	Control by active suspension (pitch)	35
5.6	Comparison of the area which the rover can't traverse (max slope angle 15[deg])	39
5.7	Comparison of the area which the rover can't traverse (max slope angle 20[deg])	39
5.8	Comparison of the area which the rover can't traverse (max slope angle 25[deg])	40
5.9	Comparison of the area which the rover can't traverse (max slope angle 30[deg])	40
5.10	Comparison of the area which the rover can't traverse (max slope angle 35[deg])	41
5.11	Control of active suspension2 (roll)	42
5.12	Algorism for control of active suspension in the area which the rover can traverse	42
5.13	Comparison of traversability (max slope angle 15[deg])	43
5.14	Comparison of traversability (max slope angle 25[deg])	44
5.15	Comparison of traversability (max slope angle 35[deg])	44
5.16	Algorism for control of active suspension	45
5.17	Simulation of the proposed rover	46
5.18	Simulation result (static stability angle)	47
5.19	Simulation result (adhesion coefficient)	47
A.1	Cock pit in the ORION	54
A.2	Display in the cock pit	55
A.3	The display separated 13 places	56
A.4	Probability of the Pilot 's eyes resting on each attention point	56
A.5	Transition map (ElsieA)	57
A.6	Transition map (ElsieB)	57
A.7	Transition map (BesieA)	58
A.8	Transition data	58
A.9	Transition Data of High Probability	58
A.10	Configuration (ECLSS)	59
A.11	Configuration (EPS Load Switch)	59
A.12	Configuration (Fault Sum)	60
A.13	Configuration (Fault Sum CL)	60
A.14	Transition map (ECLSS)	60
A.15	Transition map (EPS Load Switch)	61
A.16	Transition map (Fault Sum)	61
A.17	Transition map (Fault Sum CL)	61
A.18	Eye movement model	62

表 目 次

1.1	Evaluation of locomotion modes	7
1.2	Environmental difference[20]	8
4.1	Parameters for proposed rover	19
4.2	Parameters for proposed rover 2	29
5.1	Parameter for simulation of the rover	37

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 惑星探査の目的

1969 年、アポロ 11 号は月へ着陸し、アームストロング宇宙飛行士船長が人類にとって偉大なる一步を月面に残したことは、宇宙探査の歴史において最も有名な出来事である (Fig.1.1)。それ以降も、人類の宇宙に対する憧れや情熱、知らないものを知りたいという知的好奇心は尽きることを知らずにいる。惑星探査を行う理由は大きく分けて次の四つがある。

1. 太陽系の成り立ちや生命の起源の解明
2. 地球外生命体の発見
3. 地球外資源の発掘、実利用
4. 人類の活動範囲の拡大

集約すると、これらは人間の欲求や知的好奇心を満たすことから来ており、”自分が何故、存在するのか ”、そして ”宇宙とは一体何なのか ”という問いに答え、開発拠点を地球から宇宙へと拡大することが惑星探査の目的といえる。

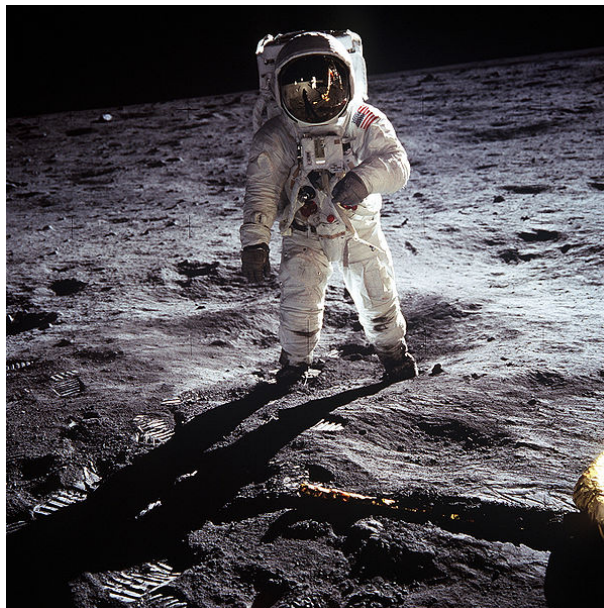


Fig 1.1: The man on the moon [1]

1.1.2 これまでの惑星探査

これまで人類は太陽系全ての惑星と、火星の衛星であるフォボス、木星のガリレオ衛星であるイオ、エウロパ、ガニメデ、そしていくつかの彗星、小惑星に無人探査機を送り込むことによって探査を行ってきた [2]。これらの探査を行う方法は、大きく分けると次の三つに分類することができる。

1. フライバイ、オービタによるリモートセンシング
2. ランダによる着陸及び、着陸付近の探査
3. ローバによる惑星表面の探査

フライバイ、オービタによるリモートセンシングは、旧ソ連の Voyager 探査機を始め、世界各国で数多くの実績がある。しかしながら、リモートセンシングにおける探査は天体表面の地質や地形形状などを、ある程度は知ることができるが、その天体の詳細な地質などを調査したいという時には物足りない。

その点において、探査機を惑星表面に着陸させ、直接地質等を調査することができるランダやローバを用いる方法はとても有効的な方法であるといえる。特にローバは天体表面を移動できるので、とても有効な手段であるといえる。

宇宙へ初めて到着したローバは月探査を行った旧ソビエト連邦の Lunakhod(1970,1973) である。その後、旧ソ連は火星の衛星フォボスに Prop-F[3] を着陸させたが、これらに関しては資料が殆ど残っていないため、詳細に関しては不明な点が多い。

1970 代後半に NASA のバイキング号、二号が火星で初めてランダによる表面探査を行った。そして次期ミッションとして火星においてローバを用いた探査を行う計画が提案され、1997 年の NASA の MarsPathfinder 計画 [4] では、惑星探査ローバ Sojourner(Fig.1.2) の火星への着陸を成功させた。Sojourner は秒速 1[cm] というスピードで慎重に移動制御が行われ、ミッション予定の 7 日を大幅に上回る 112 日もの間、探査活動を行うことに成功した。MarsPathfinder 計画は走行距離こそ短いものの、車輪型ローバの火星探査における有用性を示したこともあり、とても意義のあるミッションであったといえる。

そして、Sojourner に続く第二世代火星探査ローバとして、2004 年に NASA は Spirit と Opportunity を火星へと着陸させた (Fig.1.3)[5]。二台の機構は同じであり、移動速度は 5[cm/s] と Sojourner に比べ速いのだが、十秒動いて 20 秒静止し、周りの環境を把握した後に動作を決定するため、実際には平均速度 1[cm/s] というスピードで慎重に移動が行われた。稼働予定期間は 3ヶ月であったが、それを大幅に上回り現在も稼働中である。この二台のローバはかつて火星に水があったことなどを示す証拠の発見など、科学的にとっても大きな役割を果たしており、惑星探査におけるローバの有効性を大きく示すことに成功した。

小惑星探査に初めてローバを用いたのは、日本でのはやぶさ計画に搭載された MINERVA である (Fig.1.4)[6]。残念ながら MINERVA を惑星イトカワに着陸させることはできなかったが、多くの実験により微小重力天体におけるホッピング移動機構の有効性を示した [22]。

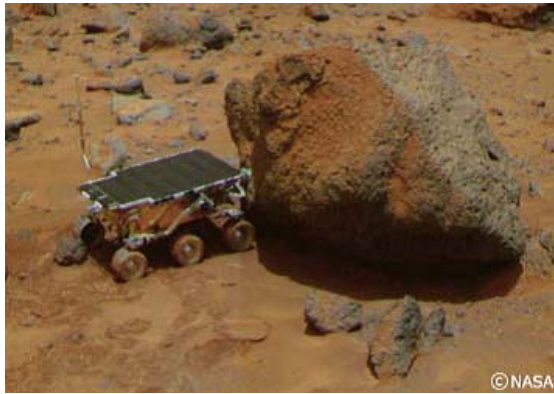


Fig 1.2: NASA rover for Mars "Sojourner" [3]



Fig 1.3: NASA rover for Mars "MER" [5]

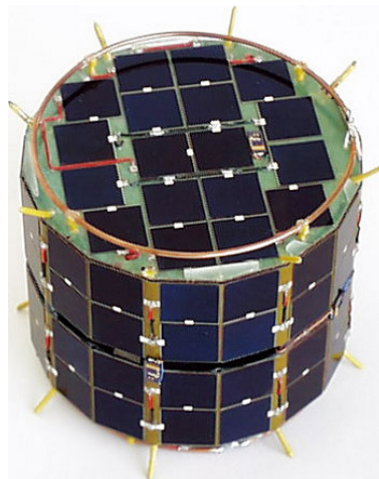


Fig 1.4: ISAS rover for Itokawa "MINERVA" [6]

1.2 惑星探査ローバの移動機構

1.2.1 ロボットの移動機構

ロボットの動作機構は、大きく分けると車輪型 [7][8][9]、クローラ型 [10][11]、脚型 [12][13][14] と分けることが出来る (Fig.1.5)。また、近年、それぞれの欠点を補う形で、車輪と脚、クローラと脚などといった複合型も出現してきている [15][16][17][18]。

一般に車輪型機構は、軟弱地盤などにおいて不整地走破能力が低いことで知られている。そこでパッシブまたはアクティブなサスペンションを擁したり、脚機構と組み合わせることなどにより問題点の解決を試みている。

クローラ型は、高い不整地走破能力はあるが、ステアリングを切ることが難しい移動機構である。現在、災害地などで活躍している不整地移動機構も主にこの形態である。また、脚機構との組み合わせにより、さらなる不整地走破性能の向上が期待できる。

脚機構は、高い障害物乗り越え能力と近年の目覚ましい姿勢安定の技術の向上などにより、信頼性は高まったが、重量、電力の点でデメリットがあり、また脚単独での移動は複雑で制御が難しいのでその用途は限られている。

各動作機構の特性を Table 4.5 に示す [19]。各機構の特性は、1 から 5 の五段階評価で行っており、1 が最もその不整地での走破性能が悪く、5 が最もその不整地での走破性能が優

れているということを意味している。なお、P.S とはパッシブサスペンションの略であり、各移動機構の不整地走破性能を登坂能力、障害物乗り越え能力、軟弱地盤走破、エネルギー消費量、簡素性といった観点から比較している。

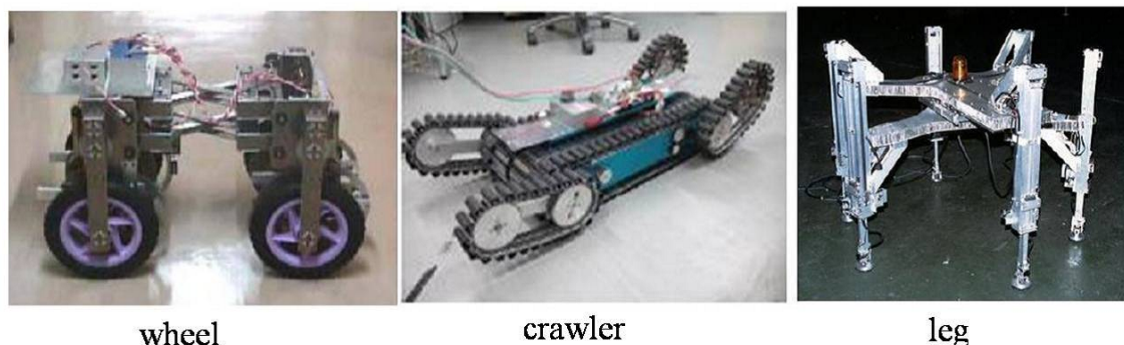


Fig 1.5: Various locomotion systems[8][10][14]

Table 1.1: Evaluation of locomotion modes

Type	Climb	Obstacle	Sinkage	Energy	Simplicity
Wheel	3	2	2	4	4
Wheel with P.S	3	4	3	4	3
Crawler	4	3	5	2	2
Leg	5	5	3	1	2
Wheel+leg	5	5	4	2	2
Crawler+leg	5	5	5	2	2

1.2.2 惑星探査ローバと地上ロボットの違い

惑星探査ローバの不整地走破方法は、重力など様々な面で地球とは異なる。環境という観点から見ると、まず惑星によって大気組成、温度、気圧、放射線の量などが違うことからローバに用いる部品には厳しい制約を受ける [20]。Table 5.1 に惑星による環境の違いを示す。

また、惑星環境以外でも大きく異なる [21]。地球のロボットは多少ロボットの性能が環境に対応していなくても、人間と協力することである程度、環境に対応することができる。具体的な例を挙げると、地球の場合は、ロボットの視覚認識力が低くても、人間自身が判断し動作を決定すれば良い。ロボット自身が動作不能になっても、人間の手を借りることで、脱出することができる。エネルギーに関しても消費すればロボット以外の第三者からの補給が可能である。またロボットが動作しやすいように人間が環境に手を加えることもできる。

一方、惑星探査ローバは、当然のことながら環境に手を加えることなどできず、転倒やスタックなどの動作不能の事態に陥った場合、永遠に動くことができない。エネルギーも地球からの蓄積を除けば、ローバは太陽光発電をするなど、自身でエネルギーを作らなければ

ならない。動作の決定は地球との協力が可能であるが、月とはともかく火星などの惑星では、通信が往復で数十分かかってしまう。そのため遅延が発生してしまうので、地球側からは大まかな方針のみ送信を行い、ローバ自身が地形を判断し、動作を決定するのが望ましい。コストの面でも大きく異なる。また、地上のロボットに比べると、コストだけではなく信頼性を重視している。このような背景から現在宇宙へ進出した、または進出するローバはエネルギー効率が良い車輪型の機構で、信頼性が高く、パッシブで段差乗り越え能力が高いサスペンション機構を擁するものが多い。また、微小重力下においては、十分に接地圧が得られないことから、ホッピング型の移動機構が望ましいと考えられる [22]。

Table 1.2: Environmental difference[20]

status	earth	moon	mars	small body
gravity[G]	1	0.168	0.383	$10^{-6} \sim 10^{-2}$
Communication time	0	2.7[s]	8 ~ 40[<i>min</i>]	10 ~ 60[<i>min</i>]
Atmospheric pressure[bar]	1.014	vacuum	0.006	vacuum
temprature[]	-15 ~ +45	-170 ~ +120	-100 ~ +15	-100 ~ +140

1.2.3 従来の惑星探査ローバの移動機構

これまで研究されてきた惑星探査ローバの移動機構についていくつか紹介する。NASA の Sojourner は、六輪でロッカーボギー機構を有している [19][23]。ロッカーボギー機構の概念図を Fig.1.6 に示す。前輪と中輪はボギーリンクによって繋がっており、後輪を含むロッカーリンクが上部から乗りかかるように接続されている。前輪が段差の壁面に到達したとき、残りの車輪の駆動力によって強く前輪を壁面に押し付ける。その結果、前輪は段差壁面を乗り越えることができる。この機構が左右に存在し、左右独立して稼働できるため、左右で高さが異なる段差を乗り越えることができる。このロッカーボギー機構で、車輪の 1.5 倍の障害物を乗り越えることが可能であると報告されている [24]。2004 年の MER 計画、2011 年の MSL 計画 [25] でもロッカーボギー機構を擁するローバが採用されることなどロッカーボギー機構は非常に高い信頼性がある。このように宇宙探査ローバはパッシブで簡素なサスペンション機構が実用性に優れている。

その他では明治大学と JAXA では PEGASUS 機構を持つローバが提案されており、このローバは 5 個の車輪を有している (Fig.1.7)[19] [23] [26]。ロッカーボギー機構に比べ、車輪が一つ少なくシンプルな機構となっている。また、左右が分断されており、左右異なる高さの障害でも走破することができる。しかしながら左右異なる段差を乗り越えた時、ボディが大きく傾き、安定性が損なわれるなどの欠点がある。

スイスの EPFL では Shrimp 機構が提案されている (Fig.1.8)[19][23]。車輪は前後に一輪ずつ、左右に二輪ずつ配置されており、前輪はフロントフォークで車体と繋がっている。前輪が段差を乗り越えると、フロントフォークに取り付けられたバネを利用し、前輪が地面に押し付けられ、その結果側面の車輪が段差を乗り越えやすくなっている [24]。

また ESA では CRAB2 機構が提案されている (Fig.1.9)[27][19]。CRAB2 機構は前後がパラレルリンク機構で真ん中の車輪に繋がれている。パラレルリンク機構とは、アームを並列に繋ぐことで、稼動範囲は減るものの、強度が増し、シリアルリンクに比べ片方の急激

1.2 惑星探査ローバの移動機構

な変化などにも安定して対応することが出来るなどといった長所がある。また、垂直抗力がまっすぐ上に効く。段差乗り越え能力はMERと同等のものをっており、前後対象であることからロッカーボギー機構と違い後進による前後の走破性の違いは無いなどといった利点がある。しかし、ボギー機構が多く簡素な機構ではないという欠点がある[19]。

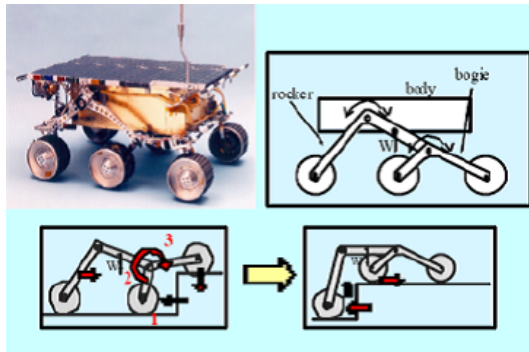


Fig 1.6: Rocky bogie suspension[28]

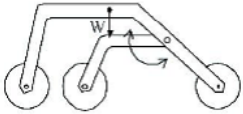

Developer	Meiji University, Japanese Aerospace Exploration Agency (JAXA)
Wheel formula	5x5
Number of actuators (mobility)	5
Wheel diameter	15 cm
Suspension unit sketch (side view)	
Picture illustration	

Fig 1.7: PEGASUS system [19]

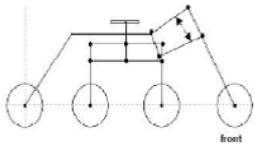

Developer	Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL), von Hoerner & Sulger (vH&S) under European Space Agency's (ESA) program
Wheel formula	6x6x2
Number of actuators (mobility)	8
Wheel diameter	15 cm
Suspension unit sketch (side view)	
Picture illustration	

Fig 1.8: Shrimp system[19]

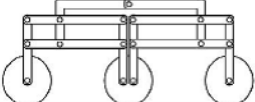

Developer	Swiss Federal Institute of Technology Zürich (ETHZ)
Wheel formula	6x6x4
Number of actuators (mobility)	10
Wheel diameter	20 cm
Suspension unit sketch (side view)	
Picture illustration	

Fig 1.9: CRAB2 system[19]

1.2.4 パッシブなサスペンションを用いた惑星探査ローバの問題点

これまで紹介したようにパッシブサスペンション機構の研究は数多く報告されており、いずれも高い不整地走破性能の改善がみられる。中でもロッカーボギーサスペンションは軽量性、安定性、車輪駆動力などの観点から “惑星探査ローバのどうあるべきか” という問いに対する一つの解としてみることができる。実際に火星で探査を行った Sojourner や Spirit、そして Opportunity は大きな成果を挙げ、それを証明している。しかしながら、一方、Opportunity や Spirit は度々砂状の土壌にはまり、スタックに陥ってしまって、幾度もミッションの中断を余儀なくされてきた (Fig.1.10)[29]。また厳しい不整地では回り道を余儀なくされており、目的地までの達成に長時間費やされてきた。それらのことから今後、より凹凸の激しいチャレンジングな砂地やクレータ等の厳しい不整地を走破するミッションではパッシブサスペンションであるロッカーボギーサスペンションでは限界があることが考えられる。

その解決策として今現在最も注目されているのがアクティブサスペンションを搭載した惑星探査ローバである。

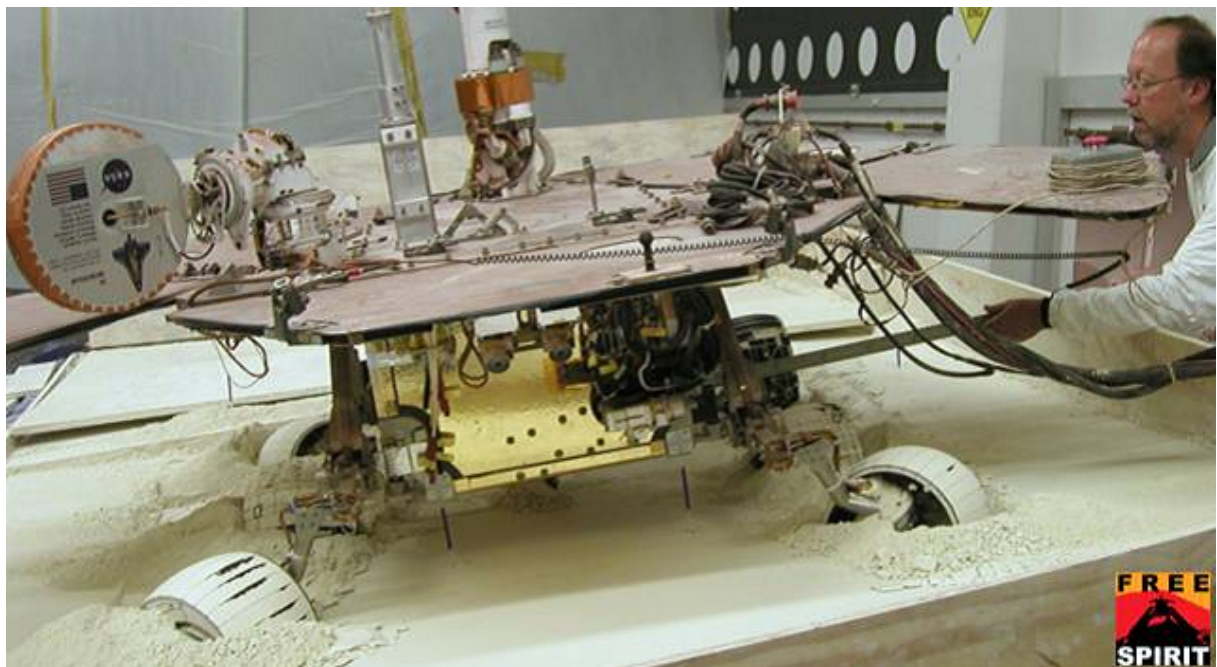


Fig 1.10: The model of NASA rover "MER2 stuck in martian sand [29]

1.3 本研究の目的

前節で、パッシブサスペンションを用いたローバでは不整地走破性に限界があると述べた。現在の惑星探査ローバミッションでは、様々な地形での走破が要求されており、新しい移動機構が求められている。

そこで本研究では、高い不整地走破性を持つローバの移動機構を構築し、惑星探査ローバの不整地走破性能の問題を解決することを目的とする。

本研究では問題の解決策として、アクティブサスペンションを有するローバを提案し、その特性について評価する。また、最適なアクティブサスペンションの制御法を考案し、アクティブサスペンションの有効性について議論する。

1.4 本論文の構成

本論文は以下のような構成とする。

- ・続く第二章では、現在、世界で研究されているアクティブサスペンションローバについていくつか紹介し、その利点や欠点について述べた後、新しいアクティブサスペンションを有するローバの提案を行う。

- ・第三章では、惑星探査ローバの不整地走破性能に関する一般的な定義を説明し、本研究で扱う不整地走破性能を表す指標の導出方法について述べる。

- ・第四章では、提案したアクティブサスペンションを有するローバの不整地走破性能について、具体的な数値を用いて比較検討を行う。

- ・第五章では、第四章の結果を参考にし、各地形でのアクティブサスペンションの制御法を提案し、シミュレーションを通してアクティブサスペンションの有効性について議論する。

- ・第六章では、本論文のまとめと、今後の課題について述べる。

第2章 アクティブサスペンションを有する惑星探査ローバ

本章では、現在研究中のアクティブサスペンションを有するローバについて紹介し、その利点や欠点について述べる。そして、新しいアクティブサスペンションを有するローバを提案する。

2.1 従来のアクティブサスペンションを用いた惑星探査ローバ

これまでに NASA や ESA など各地の宇宙機関でいくつかアクティブサスペンションを有するローバが研究されている。それらについて紹介する。

月面有人探査ローバとして将来用いられる予定の NASA の Chariot[30] は、Fig.2.1 に示すように、6箇所各二輪ずつ、計 12 車輪を有し、車輪すべてにアクティブサスペンション機構を擁し、全方位に方向転換可能である。また、それぞれ脚の能力も備えておりスタックした場合でも持ち上げることができる。

同様に、NASA が開発している月面有人探査ローバ ATHLETE[31] も Fig.2.2 に示すようにアクティブサスペンション搭載のローバで、脚は腕として利用することができ、車輪用モータでドリルなどのパワーツールなどが使えるようになっている。

しかしながら、これら Chariot や ATHLETE は、有人探査を目的としたローバでアクティブサスペンションは不整地走破のためでもあるが、むしろ人間を乗せるための車体安定のために用いられる。そのため、無人探査ローバと要求される能力が異なる。また機構もかなり複雑となっている。これは人間と協調してメンテナンスが可能であることなども理由の一つと考えられる。本研究で提案するローバは低コストな無人探査を目的としており、これらとは多少異なる。

アクティブサスペンションを備えた無人探査ローバはまだあまり研究されていないものの、カーネギーメロン大学の Scarab[32] や、NASA の SRR[33]、ESA の ExoMars 計画で用いられる予定の RCL-E[34] などがある。

Scarab と SRR はサイズなどは異なるものの、リンク機構は同等の構造となっており、四車輪で左右中央のリンク部分にモータがあり、これがアクティブサスペンションとして働く。中央のリンク部分を動かすことで左右の高さを変えることができ、車体を平行にすることができる。ローバの安定性を高めることができる。この機構は比較的シンプルで簡素性に優れており、高い安定性が得られるのだが、姿勢を安定化させるために左右の足の位置を大幅にずらすため、各足の接地圧が均等になりにくいといった欠点がある。

RCL-E は ESA の EXOMars 計画で火星に送られる予定のローバであり、各脚すべてにアクティブサスペンションが搭載されている [19]。車体を平行化できることや、五車輪をアンカーとして固定し、一車輪ごとに、1 インチずつずらして移動を行うなど斜面でも安

定した移動方法を取ることができる。

しかしながら、RCL-E は車輪、ステアリング、アクティブサスペンションで計 18 個のモータを擁しており、複雑で、エネルギー効率が悪いといった欠点がある。

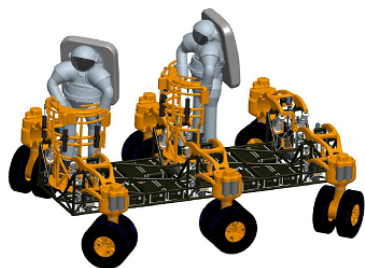


Fig 2.1: NASA rover "Chariot"[30]



Fig 2.2: NASA rover "ATHLETE"[31]

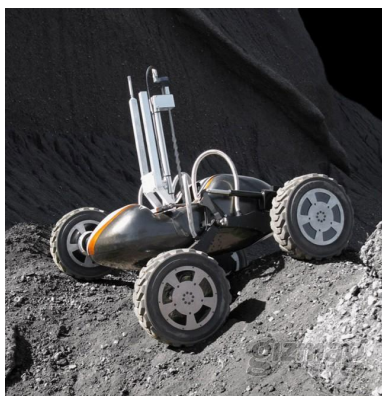


Fig 2.3: CMU rover "Scarab"[32]

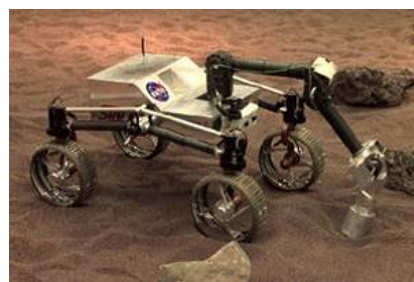


Fig 2.4: NASA rover "SRR"[33]

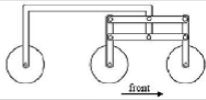
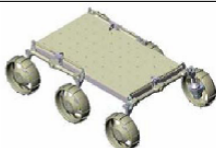
Developer	Rover Science and Technology Company (RCL), Russian Federation
Wheel formulae	6x6x4+4W; 6x6x4+6W
Number of actuators (mobility)	10 (+4,+6)
Wheel diameter	35 cm
Suspension unit sketch (side view)	
Picture illustration	

Fig 2.5: ESA rover for Mars "RCL-E"[34]

2.2 提案する惑星探査ローバ

そこで本研究では、エネルギー効率や簡素性を高めるために、少ないモータ数でアクティブサスペンションを実現し、かつ高い不整地走破性を持つローバを提案する。

そのようなローバを実現にするには、まずパッシブな状態で優れた機構を持つローバをベースにする必要がある。そこでリンク機構に、ロッカーボギーサスペンション機構を改良した Rocky7 の機構を参考にした [35]。そのリンク機構を Fig.2.6 に示す。この Rocky7 の機構は後輪と中輪を繋ぐボギー部分が直線的に繋がれており、段差などを乗り越える際など、乗り越え方向の力が発生しやすく、不整地走破性能に大変優れていると報告されている [35]。Fig.2.7 に示すように、この Rocky7 の機構に加え、各脚にアクティブサスペンションを加えたものを本論文では提案する。Fig.2.8 に提案したローバの外形を示す。各脚のアクティブサスペンションの取り付け箇所を Fig.2.8 の左の図に赤印で示す。モータは車輪に六つ、ステアリングを前輪二つに取り付け、各脚の関節部分のアクティブサスペンションとして四つ、計十二個を有している。Fig.2.8 の右図に示すように後輪の脚とボギー部分を繋ぐジョイントと左右の前輪の中央にあるジョイントはフリージョイントとなっており、接地点が三点決まると、他の接地点も決定され、六つすべての接地点が地形に沿うように接地するようになっている。各脚のパッシブサスペンションの取り付け箇所を Fig.2.8 の右の図に青印で示す。

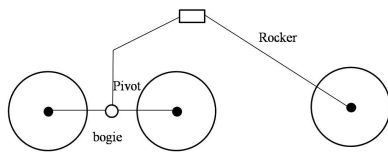


Fig 2.6: NASA rover "Rocky7"[35]

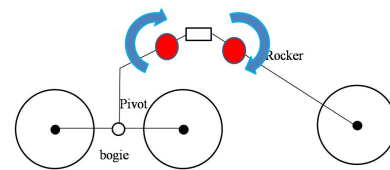


Fig 2.7: Active suspension

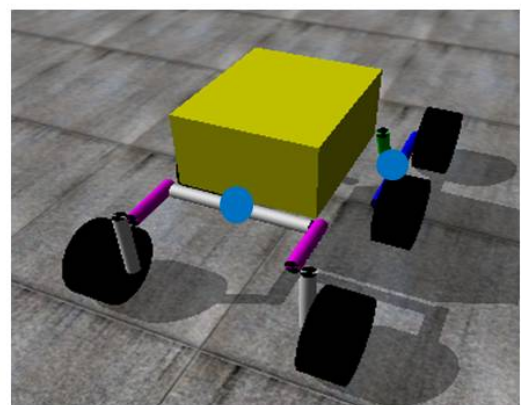
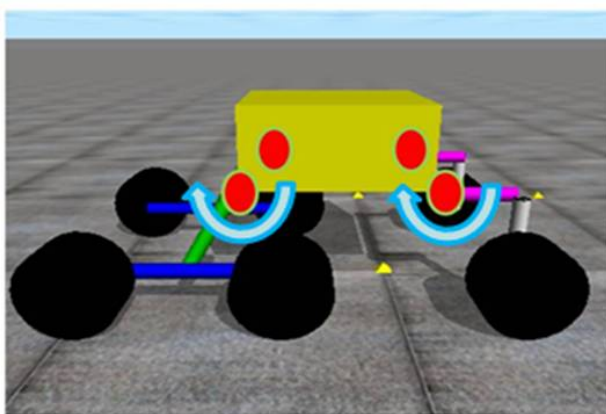


Fig 2.8: Proposed rover model

第3章 不整地走破性能を表す指標の定義

提案するアクティブサスペンションを有するローバの不整地走破性能について評価を行うにあたり、不整地走破性能を評価する指標が必要となる。そこで本章では、まず不整地走破性能の一般的な定義について述べ、本研究で扱う具体的な指標の導出方法について述べる。

3.1 不整地走破性能の一般的な定義

不整地とは、一般的に段差、斜面、溝、障害物等のある場所で、具体的には災害地や山岳地帯、そして月や火星などの惑星表面などがある。不整地走破性能の定義についてはさまざまな指標が提案されているが、統一したものは未だない。しかし、不整地走破性能の有無を表す妥当なパラメータとして次の六項目が指標になると考えられる [36]。

- ・ 車輪の路面粘着性
- ・ 車体の転倒安定性
- ・ 段差乗り越え能力
- ・ スタック脱出能力
- ・ モータの駆動力の限界
- ・ 不整地走破時のエネルギー消費量

車輪の路面粘着性とは、それぞれの車輪の重力方向にかかる接地荷重のバラつきを表す指標であり、これは登坂角度の限界やエネルギー効率、砂地での沈みやすさやせん断力などに影響する。

転倒安定性とは、車体の転倒のしにくさを表す指標であり、段差乗り越え能力とは、ローバがどれほどの段差を乗り越えられるかを表す指標である。

またスタック脱出能力とは、スタックしてしまった場合、どれほど脱出しやすいかを表す指標であり、モータの駆動力の限界は車輪が発揮できる最大駆動力に影響する。

不整地走破時のエネルギー消費量とは、いかにエネルギー的に効率よく不整地を走破できるかを表す指標である。

最初の四つはモータなどの出せる力に比例するが、その機構が不整地を原理的に走破可能であることを示す物理量であり、後の二つはモータの性能や最大出力電力によって限界が決定される物理量である。

本研究では、最初のステップとして車体の路面粘着性と転倒安定性に重点を置くことにする。

3.2 路面粘着性の指標の定義

路面粘着性とは、いかに各車輪が地面に均等に接地しているかを表す指標である。式(3.1)に路面粘着性の導出式を示す。(Fig.3.1)

$$\Phi = \sqrt{\sum_{i=1}^n (N_i - \tilde{N})^2} \quad (3.1)$$

n は車輪の総数を表している。また、 \tilde{N} は各車輪に平均に荷重がかかった時の重力方向の接地荷重であり、 N_i は車輪 i における重力方向の接地荷重である。この式は各車輪の接地荷重のバラつきが大きいほど、大きくなり、バラつきが小さいほど小さくなる。即ち、 Φ が小さいほど、不整地走破性能は高い。例として、登坂を行う場合を考える。登坂の際、後輪の接地荷重は重くなり、前輪の接地荷重は軽くなる。その結果、路面粘着性の指標が大きくなり、小さい時に比べ、牽引力が減ってしまうことがある。そして、登れる斜面の角度が減少し、不整地走破性が悪くなる。具体的な登れる傾斜角度については、後の具体的な数値を用いてのシミュレーションで検討する。

月面などを想定した場合、地面は砂地などであることが予想され、車輪が沈下することや、斜面をせん断（破壊）してしまうことが考えられる。沈下量とせん断強度（土壌の破壊基準）の関係式は式(3.2)、式(3.3)で表される[37]。

$$z = \left(\frac{p}{k}\right)^{\frac{1}{s}} \quad (3.2)$$

$$\tau_{max} = c + \sigma \tan \gamma \quad (3.3)$$

p は接地圧、 z は沈下量、 k は土壌の変形係数、 s は実験により求められる定数であり、 τ_{max} はせん断強度、 σ は垂直応力、 γ は垂直応力の効く角度、 c は土壌に関する定数である。接地圧 p と垂直応力 σ が各車輪の接地荷重と関係しており、どちらも接地荷重が大きければ、大きくなり、沈下量と地形破壊の可能性が大きくなることを示している。これらの被害を少なくするには、なるべく全体の接地荷重のバランスを均等にさせることが考えられ、砂地の場合についても路面粘着性を良くすることで走破性をあげられることが考えられる。

また、砂地での登坂能力も平地での登坂限界と同様に、トルクが無限に出せるときは、各車輪の接地荷重に関係無く、登坂限界角度は変わらないのだが、トルクを有限にした時、登坂限界角度は路面粘着性が高い方が優れていると報告されている[38][39]。つまり、 Φ が低ければ低いほど不整地走破性能が高いということを意味する。

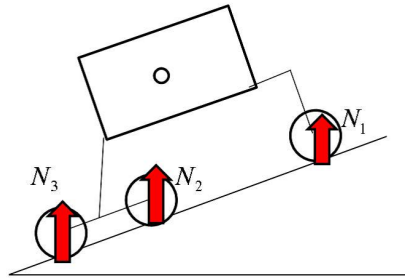


Fig 3.1: load of each wheel

3.3 転倒安定性の指標の定義

本節では、ロボットの安定性を表す指標についての考察を行う。これまでロボットがいかに安定であるかを表す指標というのは数多く議論されてきたので、それについていくつか紹介する。

静的なロボットの安定性を評価する指標で、最も知られているのが安定余裕である。これは、水平床面上の多脚移動ロボットの重心を投影したときの、支持脚多角形と重心の投影点との距離の最小値を採用しているものである (Fig.3.2)。また動的であるロボットの安定余裕は、ゼロモーメントポイント (ZMP) を考慮しなければならない。ZMP とは、胴体重心のモーメントの水平成分がゼロとなるような点のことを指す。このゼロモーメントポイントを投影したときの、支持脚多角形と重心の投影点との距離の最小値が、動的である場合の安定性の指標となる [40]。

しかしながら、本研究で扱うローバは十分遅い速度で移動するので、静的であるとして扱って良いと考えられる。

そこで、静的である安定余裕の指標を用いればいいのだが、今までに提案された安定余裕には欠点がある。何故なら、この指標は地面が平らな場合は正しい値が得られるのだが、斜面などを移動する場合には、この値が正しい指標であるとは限らないからである。例として Fig.3.2 のような場合を考えてほしい。直感的には、左側に転倒しやすいように思えるが、この安定余裕の指標を用いると左側の安定性の方が大きいことになる。

そこで、この問題を解決するために静的安定角を求めるといった方法が提案されている [41]。Fig.3.2 の二次元モデルに示すように前輪側の静的安定角 Ψ_1 は、支持脚多角形と重心からの投影点との最小距離を成す地点を結んだベクトル \vec{v}_1 と、重心から重力方向へのベクトル \vec{G} が織り成す角度

$$\Psi_1 = \sigma \arccos \frac{\vec{v}_1 \cdot \vec{G}}{|\vec{v}_1| |\vec{G}|} \quad (3.4)$$

で求めることができる。車体の中心から重力方向へ降ろした垂線が、支持脚内の内側か外側にあるかは、 \vec{v}_1 と \vec{G} の外積の方向

$$\sigma = \begin{cases} 1 & \vec{v}_1 \times \vec{G} \text{ のベクトルの方向が奥} \\ -1 & \vec{v}_1 \times \vec{G} \text{ のベクトルの方向が手前} \end{cases} \quad (3.5)$$

で、判別することができる。

同様の方法で、後輪側の静的安定角を Ψ_2 を求めると、Fig.3.2 のローバの静的安定角 Ψ は、

$$\Psi = \text{Minimum}(\Psi_1, \Psi_2) \quad (3.6)$$

で求まる。この指標を用いれば高さ成分も考慮に入れた安定性の評価を行うことが可能となる。

同様に高さ成分を考慮に入れた安定性の指標として、力学的エネルギー安定余裕というものがある [42]。Fig.3.3 に示すようにロボットが転倒する場合、二つ接地点を結ぶ直線を軸

として回転すると考えることができる。ロボットが転倒してしまうためには、重心がこの直線の上空を越えなければならない、この時必要なエネルギーは重心の位置エネルギーの変化と等しいので、重心の現在の重力方向の位置と直線の上空を通過する瞬間の重力方向の位置との距離が転倒に必要なエネルギーと考えることができる。力学的エネルギー安定余裕とは、その最小値を指標としたものである。

例として Fig.3.3 の場合、前輪側の力学的エネルギー安定余裕を E_1 、後輪側を E_2 とすると、力学的エネルギー安定余裕は、

$$E = \text{Minimum}(E_1, E_2) \quad (3.7)$$

となる。

安定余裕角も、力学的エネルギー安定余裕も、どちらも高さ成分を考慮に入れた安定性の指標であり、静的なローバの安定性を表す指標としてどちらも適切であるといえる。本研究では、得られる値が角度であり、力学的エネルギー安定余裕に比べ、直感的にわかりやすい安定余裕角を安定性の指標として採用することにする。

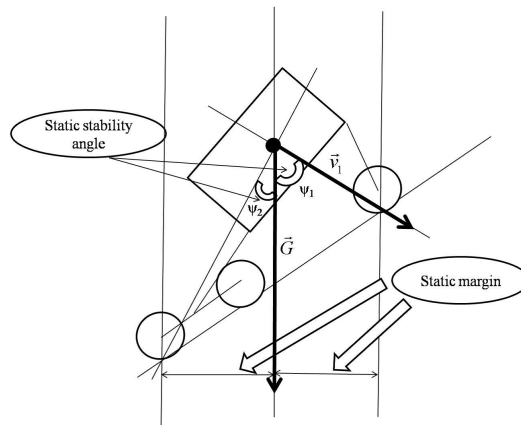


Fig 3.2: Stability margin and static stability angle

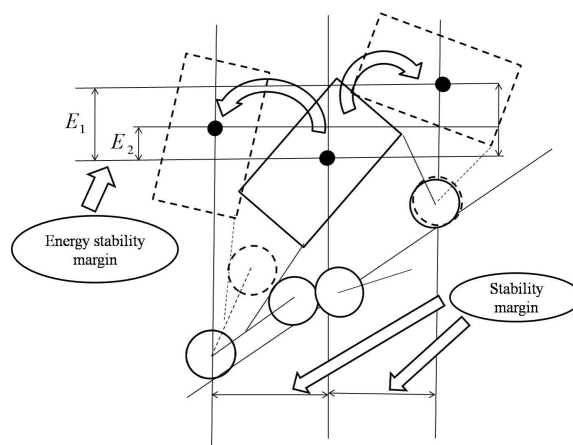


Fig 3.3: Stability margin and energy stability margin

第4章 不整地走破性能の数値解析

本章では、提案したアクティブサスペンションを有するローバに関して、不整地走破性能の評価を行う。

まず、最初に提案したローバの各車輪の接地点の座標の導出を行う。その後、提案したローバの路面粘着性、安定余裕角の導出を行う。次に、各車輪の接地荷重を理想的に等しくした時と、そのままの場合との登坂性能の比較を行う。

4.1 ローバの数学モデル

提案するローバの数学モデルを構築するために、座標系及び、各パラメータを定義する。ローバの各パラメータを Table 4.1 に示す。本パラメータを用いたローバを Fig.4.1、Fig4.2 に示す。

Table 4.1: Parameters for proposed rover

symbol	meaning
l_1	length of the front leg (y)
l_2	length of the front leg (z)
l_3	length of the rear leg (y)
l_4	length of the rear leg (z)
l_5	length of the bogie/2
w_{body}	wigth of the body/2
h_{body}	height of the body/2
d_{body}	depth of the body/2
r_w	raidous of the wheel
M	weight of the rover
$\theta_x, \theta_y, \theta_z$	inclination of the body (pitch,roll,yaw)
$\theta_{leg1}, \theta_{leg2}, \theta_{leg3}, \theta_{leg4}$	angles of the active suspensions
$\theta_{bogie1}, \theta_{bogie2}, \theta_{front}$	angles of the free joints

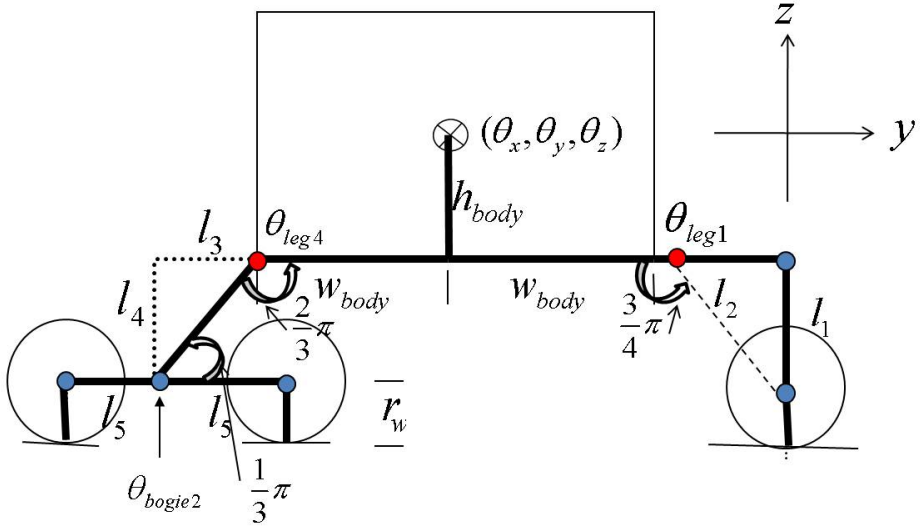


Fig 4.1: Proposed rover's parameter 1

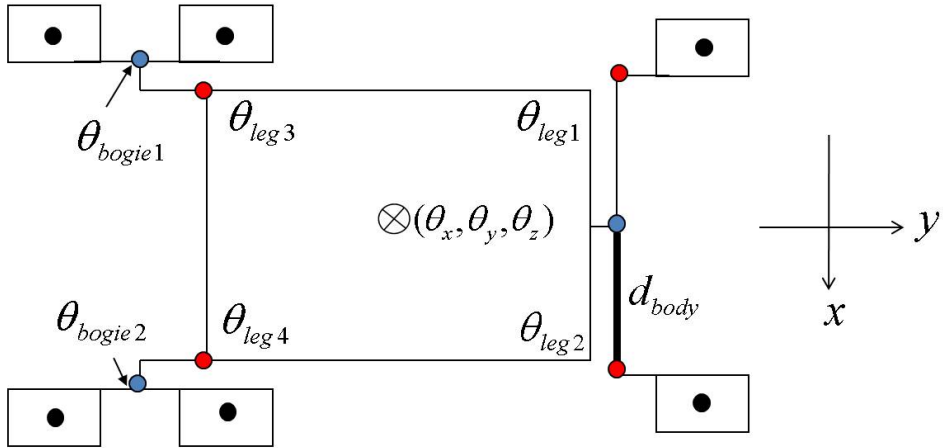


Fig 4.2: Proposed rover's parameter 2

4.2 各不整地走破性能を表す指標の導出

提案したローバの路面粘着性、転倒安定角の導出をする準備段階として、各車輪の接地点の座標の導出を行う。その後、提案したローバの路面粘着性、転倒安定角の導出を行う。

4.2.1 各車輪の接地点の座標の導出

車体の傾き、各ジョイントの角度が、傾斜センサ、エンコーダ等でわかるとすると、それぞれの車輪の接地点は、Fig.4.1、Fig.4.2 により式 (4.1)～式 (4.6) で表すことができる。 p_i (i は車輪番号)は各車輪の接地点の座標を意味する。なお、座標の中心をボディの中心位置とし、すべての車輪が地面に接地していると仮定する。また、車体の傾き(θ_x 、 θ_y)、ボギー部分のフリージョイントの角度(θ_{bogie1} 、 θ_{bogie2})、アクティブサスの角度(θ_{leg1} 、 θ_{leg2} 、 θ_{leg3} 、 θ_{leg4})、車体と前脚を繋ぐフリージョイント(θ_{front})の各回転行列(R_{θ_x} 、 R_{θ_y} 、 $R_{\theta_{bogie1}}$ 、 $R_{\theta_{bogie2}}$ 、 $R_{\theta_{leg1}}$ 、 $R_{\theta_{leg2}}$ 、 $R_{\theta_{leg3}}$ 、 $R_{\theta_{leg4}}$ 、 $R_{\theta_{front}}$)を、式 (4.7)～式 (4.15) で定義する。

$$\vec{p}_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = R_{\theta_y} R_{\theta_x} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ w_{body} \\ -h_{body} \end{bmatrix} + R_{\theta_{front}} \left(\begin{bmatrix} d_{body} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + R_{\theta_{leg2}} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ l_2 \\ -(l_1 + r_w) \end{bmatrix} \right) \right) \right) \quad (4.1)$$

$$\vec{p}_2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = R_{\theta_y} R_{\theta_x} \left(\begin{bmatrix} d_{body} \\ -w_{body} \\ -h_{body} \end{bmatrix} + R_{\theta_{leg4}} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ -l_3 \\ -l_4 \end{bmatrix} + R_{\theta_{bogie2}} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ l_5 \\ -r_w \end{bmatrix} \right) \right) \right) \quad (4.2)$$

$$\vec{p}_3 = \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix} = R_{\theta_y} R_{\theta_x} \left(\begin{bmatrix} d_{body} \\ -w_{body} \\ -h_{body} \end{bmatrix} + R_{\theta_{leg4}} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ -l_3 \\ -l_4 \end{bmatrix} + R_{\theta_{bogie2}} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ -l_5 \\ -r_w \end{bmatrix} \right) \right) \right) \quad (4.3)$$

$$\vec{p}_4 = \begin{bmatrix} x_4 \\ y_4 \\ z_4 \end{bmatrix} = R_{\theta_y} R_{\theta_x} \left(\begin{bmatrix} -d_{body} \\ -w_{body} \\ -h_{body} \end{bmatrix} + R_{\theta_{leg3}} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ -l_3 \\ -l_4 \end{bmatrix} + R_{\theta_{bogie1}} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ -l_5 \\ -r_w \end{bmatrix} \right) \right) \right) \quad (4.4)$$

$$\vec{p}_5 = \begin{bmatrix} x_5 \\ y_5 \\ z_5 \end{bmatrix} = R_{\theta_y} R_{\theta_x} \left(\begin{bmatrix} -d_{body} \\ -w_{body} \\ -h_{body} \end{bmatrix} + R_{\theta_{leg3}} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ -l_3 \\ -l_4 \end{bmatrix} + R_{\theta_{bogie1}} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ l_5 \\ -r_w \end{bmatrix} \right) \right) \right) \quad (4.5)$$

$$\vec{p}_6 = \begin{bmatrix} x_6 \\ y_6 \\ z_6 \end{bmatrix} = R_{\theta_y} R_{\theta_x} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ w_{body} \\ -h_{body} \end{bmatrix} + R_{\theta_{front}} \left(\begin{bmatrix} -d_{body} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + R_{\theta_{leg1}} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ l_2 \\ -(l_1 + r_w) \end{bmatrix} \right) \right) \right) \quad (4.6)$$

$$R_{\theta_x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & -\sin\theta_x \\ 0 & \sin\theta_x & \cos\theta_x \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$R_{\theta_y} = \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & \sin\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$$R_{\theta_{bogie1}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{bogie1} & -\sin\theta_{bogie1} \\ 0 & \sin\theta_{bogie1} & \cos\theta_{bogie1} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$R_{\theta_{bogie2}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{bogie2} & -\sin\theta_{bogie2} \\ 0 & \sin\theta_{bogie2} & \cos\theta_{bogie2} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$R_{\theta_{leg1}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{leg1} & -\sin\theta_{leg1} \\ 0 & \sin\theta_{leg1} & \cos\theta_{leg1} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$R_{\theta_{leg2}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{leg2} & -\sin\theta_{leg2} \\ 0 & \sin\theta_{leg2} & \cos\theta_{leg2} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$R_{\theta_{leg3}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{leg3} & -\sin\theta_{leg3} \\ 0 & \sin\theta_{leg3} & \cos\theta_{leg3} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$R_{\theta_{leg4}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{leg4} & -\sin\theta_{leg4} \\ 0 & \sin\theta_{leg4} & \cos\theta_{leg4} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$R_{\theta_{front}} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{front} & 0 & \sin\theta_{front} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{front} & 0 & \cos\theta_{front} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

4.2.2 路面粘着性の導出

各車輪の接地点の位置が分かり、ローバが静的であるとする、各接地点でのモーメントの釣り合いの式と、重力方向の釣り合いの式が、式 (4.16) ~ 式 (4.21) により成り立つ。ここで、 g は重力加速度である。すると、提案するローバの各車輪 i (i は車輪番号) の接地荷重 N_i は、式 (4.22) によって求めることができる。

まず、重力方向の釣り合いの式は、

$$Mg = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6 \quad (4.16)$$

となる。次に各接地点でのモーメントの釣り合いの式は、

$$(y_1 - y_2)N_2 + (y_1 - y_3)N_3 + (y_1 - y_4)N_4 + (y_1 - y_5)N_5 + (y_1 - y_6)N_6 - y_1Mg = 0 \quad (4.17)$$

$$(y_2 - y_1)N_1 + (y_2 - y_3)N_3 + (y_2 - y_4)N_4 + (y_2 - y_5)N_5 + (y_2 - y_6)N_6 - y_2Mg = 0 \quad (4.18)$$

$$(y_3 - y_1)N_1 + (y_3 - y_2)N_2 + (y_3 - y_4)N_4 + (y_3 - y_5)N_5 + (y_3 - y_6)N_6 - y_3Mg = 0 \quad (4.19)$$

$$(x_1 - x_2)N_2 + (x_1 - x_3)N_3 + (x_1 - x_4)N_4 + (x_1 - x_5)N_5 + (x_1 - x_6)N_6 - x_1Mg = 0 \quad (4.20)$$

$$(x_6 - x_1)N_1 + (x_6 - x_2)N_2 + (x_6 - x_3)N_3 + (x_6 - x_4)N_4 + (x_6 - x_5)N_5 - x_6Mg = 0 \quad (4.21)$$

で求めることができる。

これらの式により、各車輪の垂直方向の接地荷重は、逆行列を用いて、

$$\begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \\ N_5 \\ N_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & (y_1 - y_2) & (y_1 - y_3) & (y_1 - y_4) & (y_1 - y_5) & (y_1 - y_6) \\ (y_2 - y_1) & 0 & (y_2 - y_3) & (y_2 - y_4) & (y_2 - y_5) & (y_2 - y_6) \\ (y_3 - y_1) & (y_3 - y_2) & 0 & (y_3 - y_4) & (y_3 - y_5) & (y_3 - y_6) \\ 0 & (x_1 - x_2) & (x_1 - x_3) & (x_1 - x_4) & (x_1 - x_5) & (x_1 - x_6) \\ (x_6 - x_1) & (x_6 - x_2) & (x_6 - x_3) & (x_6 - x_4) & (x_6 - x_5) & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Mg \\ y_1Mg \\ y_2Mg \\ y_3Mg \\ x_1Mg \\ x_6Mg \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

となる。

従って、それぞれの接地荷重が求まると、路面粘着性の指標は定義式 (3.1) より、

$$\Phi = \sqrt{(N_1 - \tilde{N})^2 + (N_2 - \tilde{N})^2 + (N_3 - \tilde{N})^2 + (N_4 - \tilde{N})^2 + (N_5 - \tilde{N})^2 + (N_6 - \tilde{N})^2} \quad (4.23)$$

で求まる。

4.2.3 安定余裕角の導出

提案するローバの安定余裕角を求める。

まず、例として Fig.4.3、Fig.4.4 に示すように、車輪の接地点 \vec{p}_1 、 \vec{p}_3 が成す辺 \vec{p}_{13} での安定余裕角を求める。

車輪の接地点 \vec{p}_1 、 \vec{p}_3 が成す辺 \vec{p}_{13} は、

$$\vec{p}_{13} = \vec{p}_3 - \vec{p}_1 \quad (4.24)$$

となる。次に車体の中心から、車体の中心から辺 \vec{p}_{13} に直交するベクトルを求めるため、辺 \vec{p}_{13} を直交化すると、

$$\vec{p}_{13u} = \frac{-\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_{13}}{|\vec{p}_{13}|^2} \vec{p}_{13} \quad (4.25)$$

となり、車体の中心から辺 \vec{p}_{13} に直交するベクトル $\vec{p}_{13\perp G}$ は、

$$\vec{p}_{13\perp G} = \vec{p}_1 + \vec{p}_{13u} \quad (4.26)$$

となる。次に、車体の中心から重力方向に向かうベクトルを \vec{G} とすると、辺 \vec{p}_{13} での安定余裕角 Ψ_{13} は、重力方向に向かうベクトルを \vec{G} と、車体の中心から辺 \vec{p}_{13} に直交するベクトル $\vec{p}_{13\perp G}$ が成す角となり、

$$\Psi_{13} = \sigma \arccos \frac{\vec{p}_{13\perp G} \cdot \vec{G}}{|\vec{p}_{13\perp G}| |\vec{G}|} \quad (4.27)$$

で求めることができる。また、車体の中心から重力方向へ降ろした垂線が、支持脚内の内側か外側にあるかは、

$$\sigma = \begin{cases} 1 & (\vec{p}_{13\perp G} \times \vec{G} \cdot \vec{p}_{13}) < 0 \\ -1 & (\vec{p}_{13\perp G} \times \vec{G} \cdot \vec{p}_{13}) > 0 \end{cases} \quad (4.28)$$

で、判別することができる。同様の方法で、 Ψ_{61} 、 Ψ_{34} 、 Ψ_{46} を求め、それらを比較し、その中の最小の値がそのローバの安定余裕角となる。

$$\Psi = \text{Minimum}(\Psi_{61}, \Psi_{13}, \Psi_{34}, \Psi_{46}) \quad (4.29)$$

Ψ を安定余裕角とする。安定余裕角が 0 を下回ると、ローバは転倒する。

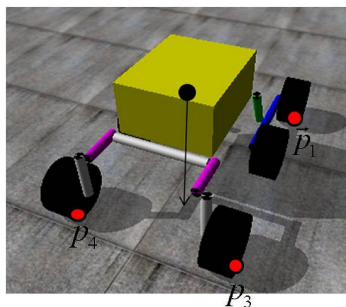


Fig 4.3: Proposed rover model 2

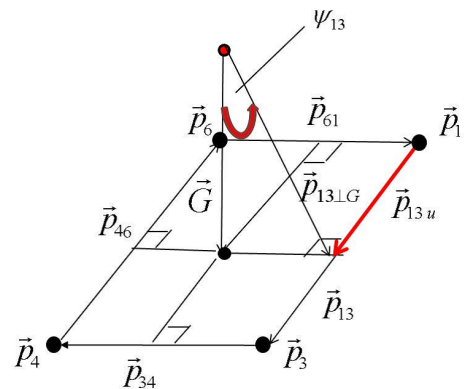


Fig 4.4: Calculation for static stability angle

4.3 接地荷重による不整地走破性能の変化

前節で、路面粘着性と静的安定角の導出を行った。本節では、接地荷重を均等化することにより、提案したローバの登坂性能がどれほど向上するのかの検討を行う。まず、ノミナルの姿勢を定義する。次に、提案するローバの簡易的な登坂モデルを導入し、すべての接地荷重を等しくした場合（路面粘着性 $\Phi=0$ ）と、ノミナル状態での、登坂性能の比較を行う。

4.3.1 ノミナル姿勢の定義

提案するローバのノミナル姿勢を Fig.4.5 に示す。アクティブサスペンション $\theta_{leg1} \sim \theta_{leg4}$ の可動域を、反時計回りの方向を正方向とすると、 $\theta_{leg1} \theta_{leg2} - 3/4\pi \sim 1/4\pi$ 、 $\theta_{leg3} \theta_{leg4} - 1/3\pi \sim 2/3\pi$ とする。

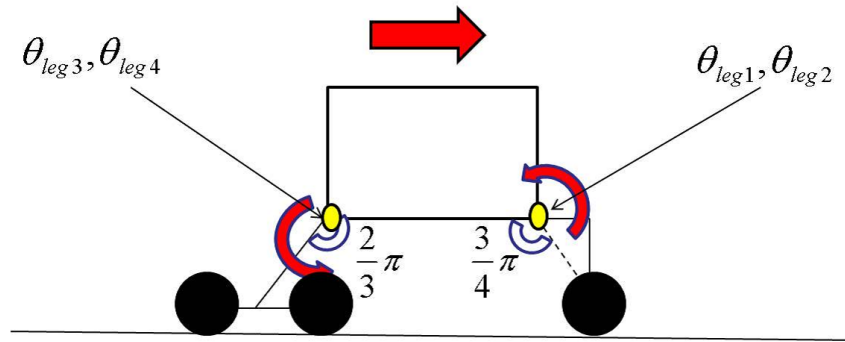


Fig 4.5: Proposed rover (Nominal)

4.3.2 提案するローバの登坂モデル

斜面を登っているローバのモデルを Fig.4.6 に示す。左右の高さが平行であり、斜面が左右対称であると仮定する。アクティブサスペンションの角度、地形の傾きが既知であるとすると、それぞれのフリージョイントの角度、ボディの傾きは、式 (4.30) ~ 式 (4.42) の幾何学的な関係により求まる。

まず、Fig.4.6 の $\theta_{1\alpha}$ 、 $\theta_{2\alpha}$ は、ノミナルの角度にアクティブサスの変位を加えたもので、

$$\theta_{1\alpha} = \frac{3}{4}\pi + \Delta\theta_{leg2} \quad (4.30)$$

$$\theta_{2\alpha} = \frac{2}{3}\pi - \Delta\theta_{leg4} \quad (4.31)$$

と表すことができる。次に、Fig.4.6 に示す $l_{1\alpha}$ 、 $l_{2\alpha}$ 、 $l_{3\alpha}$ は Table 4.1 の値を用いると、

$$l_{1\alpha} = \sqrt{l_1^2 + l_2^2} \quad (4.32)$$

$$l_{2\alpha} = 2w_{body} \quad (4.33)$$

$$l_{3\alpha} = \sqrt{l_3^2 + l_4^2} \quad (4.34)$$

で表される。すると、Fig.4.6の未知数である値 $l_{5\alpha}$ 、 $\theta_{1\beta}$ 、 $\theta_{1\gamma}$ 、 $l_{4\alpha}$ 、 $\theta_{3\alpha}$ は、これらの定義した値と、斜面の傾き α を用いて、

$$l_{5\alpha} = \sqrt{l_{2\alpha}^2 + l_{3\alpha}^2 - 2l_{2\alpha}l_{3\alpha}\cos(\theta_{2\alpha})} \quad (4.35)$$

$$\theta_{1\beta} = \cos\left(\frac{l_{5\alpha}^2 + l_{2\alpha}^2 - l_{3\alpha}^2}{2l_{2\alpha}l_{5\alpha}}\right) \quad (4.36)$$

$$\theta_{1\gamma} = \theta_{1\alpha} - \theta_{1\beta} \quad (4.37)$$

$$l_{4\alpha} = \sqrt{l_{5\alpha}^2 + l_{1\alpha}^2 - 2l_{1\alpha}l_{5\alpha}\cos(\theta_{1\gamma})} \quad (4.38)$$

$$\theta_{4\alpha} = \arccos\left(\frac{l_{1\alpha}^2 + l_{4\alpha}^2 - l_{5\alpha}^2}{2l_{1\alpha}l_{4\alpha}}\right) \quad (4.39)$$

$$\theta_{3\alpha} = 2\pi - \theta_{4\alpha} - \theta_{2\alpha} - \theta_{1\alpha} \quad (4.40)$$

となる。ボディのピッチ方向の傾き θ_x とボギー部分のフリースジョイントの角度 θ_{bogie1} は、

$$\theta_x = \arcsin\left(\frac{l_{1\alpha}\sin(\theta_{4\alpha}) - l_{3\alpha}\sin(\theta_{3\alpha})}{l_2}\right) + \alpha \quad (4.41)$$

$$\theta_{bogie1} = \theta_{3\alpha} - \frac{\pi}{3} + \alpha - \theta_x \quad (4.42)$$

で求めることができる。

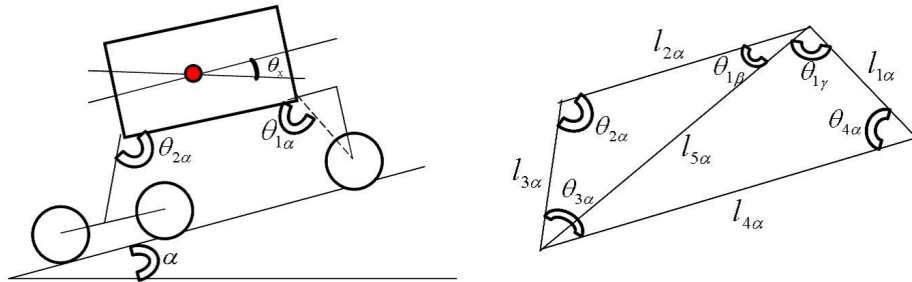


Fig 4.6: The model of rover climbing a slope

4.3.3 接地荷重による不整地走破性能の変化

前節で、簡易的な提案するローバの簡易登坂モデルを述べた。本節では、すべての接地荷重を等しくした場合（路面粘着性 $\Phi=0$ ）と、ノミナル状態での登坂性能の比較を行う。なお、実験に用いたローバの各パラメータの値を Table 4.2 に示す。

フリージョイントの角度、ボディの傾きが求まると、式 (4.1) ~ 式 (4.6) により、各車輪の接地点 p_i の位置がわかり、式 (4.16) ~ 式 (4.22) により各車輪の接地荷重 N_i が求まる。すると、各車輪が発揮できる最大の牽引力 F_{imax} は、各車輪の接地荷重 N_i と、静摩擦係数 μ を用いて、

$$F_{imax} = \mu N_i \cos(\alpha) \quad (4.43)$$

となる。

Fig.4.8 にスロープ角度を変化させた時の発揮できる最大の牽引力の関係を示す。横軸はスロープの角度 $\alpha[deg]$ で縦軸は $F_{max}[N]$ である。式 (4.43) より、各車輪の発揮できる最大の牽引力（前輪 $F1_{max}$ 、中輪 $F2_{max}$ 、後輪 $F3_{max}$ ）は接地荷重 N に比例していることがわかる。また、スロープの角度が急になるにつれて、後輪の接地荷重が増え、前輪の接地荷重が減っていくのがわかる。式 (4.44) に示すように各車輪が発揮できる最大の牽引力の合計値 $\sum_{i=1}^6 F_{imax}$ が、牽引負荷 $Mg \sin(\alpha)$ を上回ると、原理的に登坂することができる。

$$if \left(\sum_{i=1}^6 F_{imax} - Mg \sin(\alpha) > 0 \right) \quad then \quad \text{登坂可} \quad (4.44)$$

なお、最大の牽引力の合計値 $\sum_{i=1}^6 F_{imax}$ は、

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^6 F_{imax} &= \mu N_1 \cos(\alpha) + \mu N_2 \cos(\alpha) + \mu N_3 \cos(\alpha) + \mu N_4 \cos(\alpha) + \mu N_5 \cos(\alpha) \\ &\quad + \mu N_6 \cos(\alpha) = (N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6) \mu \cos(\alpha) = Mg \cos(\alpha) \end{aligned} \quad (4.45)$$

となり、たとえ接地荷重がバラバラであっても一定であることがわかる。

しかし、これらの計算式は駆動力が無制限に出せる時のみ適用でき、実際には駆動力は有限であることから、各車輪の発揮できる最大の駆動力は、最大トルクを τ_{max} 、車輪の半径を r_w とすると、

$$if \left(F_{max} > \frac{\tau_{max}}{r_w} \right) \quad then \quad F_{max} = \frac{\tau_{max}}{r_w} \quad (4.46)$$

に制限される。

例として、実際の数値を用いての検証を行う。本研究で扱うローバのモータが出せる最大電流を $2.5[A]$ とした場合、モータが発揮できる最大トルクは本研究で扱うモータの規格である減速比 $25:1$ 、トルク定数 $0.15[N/A]$ という値を用いると、最大の駆動力 $\frac{\tau_{max}}{r_w}$ は、

$$\frac{\tau_{max}}{r_w} = \frac{2.5[A] \times 25 \times 0.15[N/A]}{0.15[m]} = 62.5[N] \quad (4.47)$$

と、62.5[N]となる。

つまり、式(4.43)で求めた車輪の発揮できる最大の牽引力が62.5[N]を上回った場合、最大の牽引力は62.5[N]に修正されることを意味する。Fig.4.9にスロープによる各車輪の牽引力(前輪F1、中輪F2、後輪F3)、全体を平均化した時の牽引力(Faverage)、モータが発揮できる最大の駆動力(Maxtorque)の関係を示す。縦軸が、力[N]で、横軸がスロープの角度[deg]である。Fig.4.9に示すように修正された分が損失となり、その結果、牽引力の合計値は接地荷重が均等である場合に比べ、均等でない場合の方が小さくなる。

Fig.4.10に、スロープによる牽引力と牽引負荷の関係を示す。横軸はスロープの角度[deg]で縦軸は力[N]である。牽引力がFig.4.10に示すように $Mg\sin\theta$ を上回っていれば、その斜面は登坂可能であることを意味する。

発揮できる最大電流を2.5[A]に制限した場合、各車輪の接地荷重を平均化した場合とそのままの場合を比較すると、牽引力と牽引負荷との交点の場所が異なる。この交点の位置のスロープの角度が最大登坂角度であり、この場合、接地荷重を均等化した場合の登坂角度は35[deg]であり、変化させなかった場合の最大登坂角度は31[deg]となっており、接地荷重を均等化した場合の方が登坂性能が上がることを意味している。

仮にモータの発揮できる力を無制限とすると、牽引力の合計値はどちらも等しい値となり、どちらでもこの場合、最大登坂角度は35[deg]となる。

しかし、発揮できる力が同じである場合でも全ての接地荷重が等しい方がエネルギー効率が良い。何故なら、消費エネルギー量 P は、電圧 V と抵抗 R と電流 I の関係から

$$P = VI = RI^2 \quad (4.48)$$

より、電流の二乗に比例し、電流はトルク τ とすると、

$$I = C_1 \tau \quad : C_1 \text{ は係数} \quad (4.49)$$

により、トルクに比例する。そして発揮できる最大トルク τ_{max} と各車輪が発揮できる最大の駆動力 $\mu N_i \cos(\alpha)$ は、

$$\mu N_i \cos(\alpha) = \frac{\tau_{max}}{r_w} \quad (4.50)$$

$$\tau_{max} = C_2 N_i \quad : C_2 \text{ は係数} \quad (4.51)$$

より、接地圧に比例するので、消費エネルギー量は接地荷重の二乗に比例するといえる。各車輪の接地荷重の合計値は式(4.45)より常に等しいので、接地荷重の二乗の式は、それぞれの接地荷重が均等である場合に最小値をとる。このことから、路面粘着性を良くすることは、登坂性能を高め、かつエネルギー消費量も抑えることができるといえる。

しかし、アクティブサスペンションを動かすことにより、エネルギー消費量が増えるので、その点については考察する必要がある。

Table 4.2: Parameters for proposed rover 2

symbol	meaning	unit
l_1	length of the front leg (y)	0.25[m]
l_2	length of the front leg (z)	0.25[m]
l_3	length of the rear leg (y)	0.22[m]
l_4	length of the rear leg (z)	0.25[m]
l_5	length of the bogie/2	0.3[m]
w_{body}	wigth of the body/2	0.3[m]
h_{body}	height of the body/2	0.14[m]
d_{body}	depth of the body/2	0.26[m]
r_w	raidous of the wheel	0.15[m]
M	weight of the rover	60[kg]
μ	friction coefficient	0.7

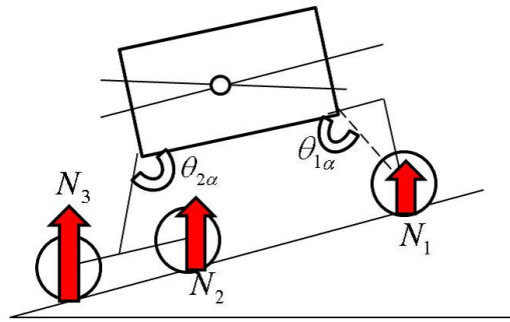


Fig 4.7: The model of rover climbing a slope 2

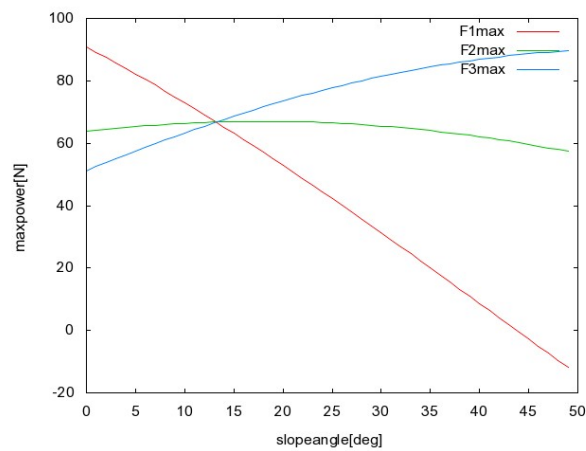


Fig 4.8: The difference of max power of each wheel by changing slope angle

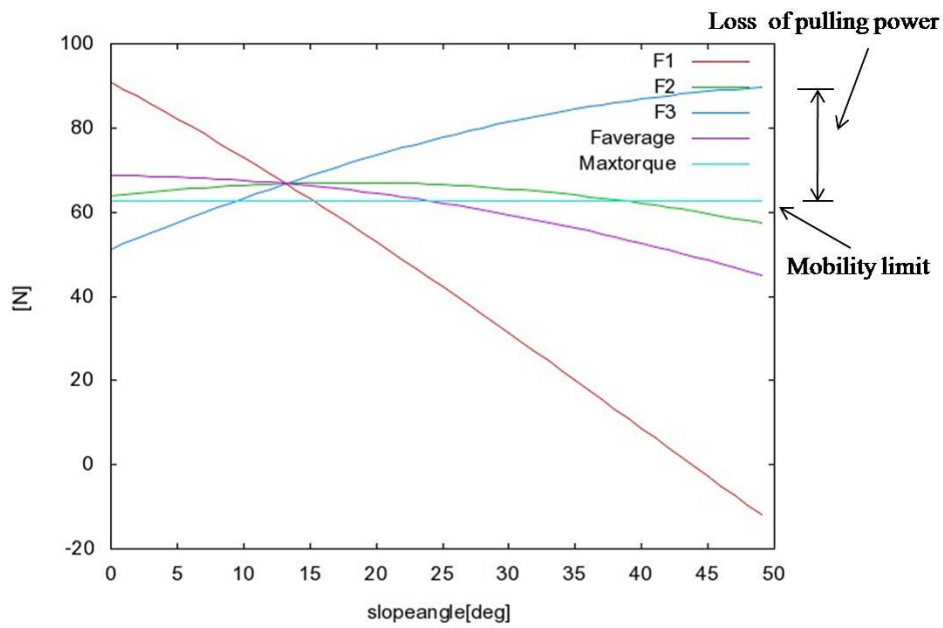


Fig 4.9: The difference of max power of each wheel and limited torque by changing slope angle

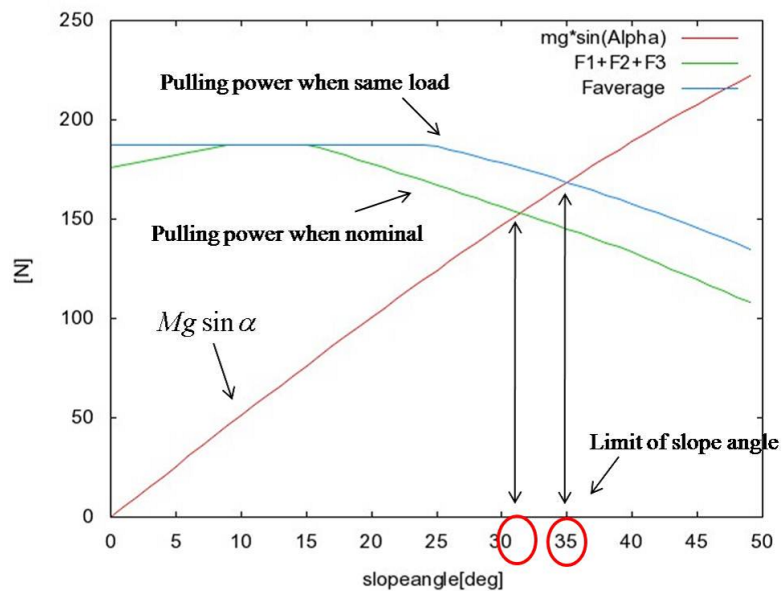


Fig 4.10: The difference of climbing slope ability between natural contact weight and average contact weight with limited torque

第5章 不整地走破性能を高める アクティブサスペンションの制御

本章では、第3章で述べた不整地走破性能の指標である路面粘着性と静的安定角を高めるアクティブサスペンションの制御法について提案する。

本章の流れとしては、まず、アクティブサスペンションの制御方法の考え方について述べる。はじめに、ロール方向とピッチ方向の制御における各不整地走破性能の相関性について検討する。そして、最適な制御アルゴリズムを提案し、具体的なピッチ、ロール方向の制御方法について述べる。その後、地形の情報をあらかじめ既知としたシミュレーション検討を行い、アクティブサス使用前と使用後の不整地走破性能の比較を行う。最後に、ダイナミクスを考慮したシミュレーション検討を行う。

5.1 アクティブサス制御の考え方

5.1.1 アクティブサス制御の考え方（ロール方向）

アクティブサスペンションを制御するにあたり、本論文ではロール方向(Y 軸まわり)とピッチ方向(X 軸まわり)の二つに分けて考えることにした。まず、ロール方向の不整地走破性能について考察する。Fig.5.1 に、ロール方向の制御前と制御後の例を示す。ここでわかることは、ロール方向の不整地走破性能の指標である路面粘着性と静的安定角は相関性があるということである。つまり、

路面粘着性を良くする。(左右の接地荷重を均等にする。)

ロール方向の車体の傾きを0にする。

静的安定角を大きくする。

ロール方向の車体の傾きを0にする。重心を下げる。

ということであり、これは、静的安定角を大きくすることが路面粘着性を良くすることと相関していることを意味する。以上のことから、ロール方向のアクティブサスの制御は車体が平行となり、重心が低くなるようにすることが良いといえる。

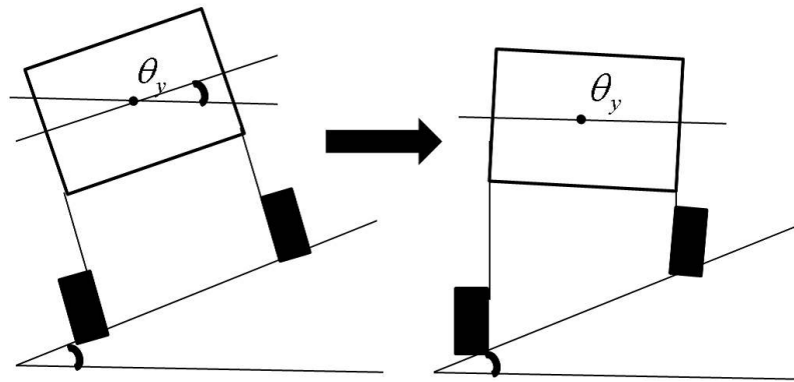


Fig 5.1: Control method for active suspension (roll)

5.1.2 アクティブサス制御の考え方（ピッチ方向）

一方、ピッチ方向の制御は相関性が無い場合がある。その例として、登坂している場合を考える。Fig.5.2 に提案するローバが登坂している場合を示す。ここでの各不整地走破性能は、

路面粘着性を良くする。

登坂時は後輪に荷重が多くかかるため、後輪を遠ざける。もしくは前輪を近づける。

静的安定角を大きくする。

後輪、前輪とも重心から遠ざける。

と、静的安定角と路面粘着性が、相反する場合があります、どちらを優先すべきか考察する必要があります。

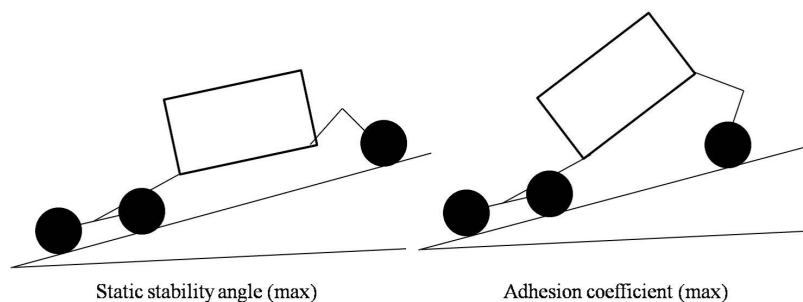


Fig 5.2: Control method for active suspension (pitch)

5.2 アクティブサスの制御法

（ノミナルの状態では走破不可能の領域）

ピッチ方向の制御は、路面粘着性を良くすることと静的安定角を大きくすることが相反する場合があります、どちらを優先すべきか考察する必要があることがわかった。

そこで、まず走破ができない場合というものを考えると、

1. 転倒してしまう場合 静的安定角が0以下 $\Psi < 0$
2. 登坂できない場合 牽引力 - 牽引負荷 < 0

という二つのケースが考えられる。

これらのことが意味することの一つとして、走破するためには静的安定角は必ずしも大きくする必要は無く、0を下回らなければ良いということがある。つまり、どうしても接地荷重を良くしないと走破できない不整地などでは、静的安定角を最低0以上に確保しながら、最大限に路面粘着性を上げることが望ましいといえる。

以上のことから走破できない場所を走破するためのアクティブサスの制御アルゴリズムとして、Fig.5.3 に示す制御アルゴリズムを提案する。まず、ロール方向を平行にすることで、車体の安定性と路面粘着性を高める。その後、走破できない場合に限り、前脚を動かすことで前後の接地荷重を変化させる。次節では、ロール方向とピッチ方向の具体的な制御法について述べる。

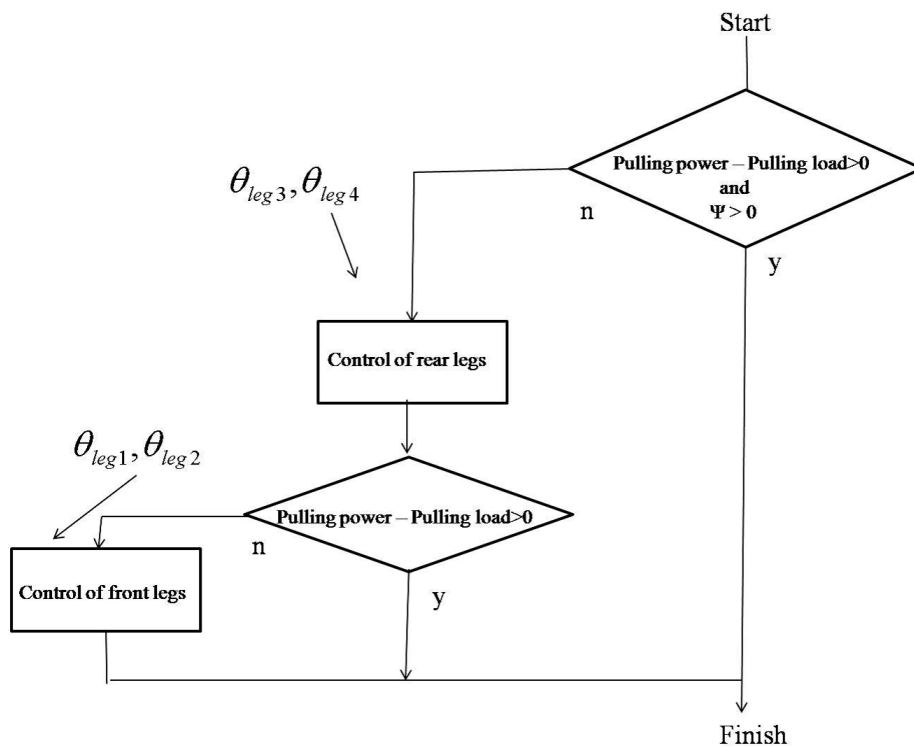


Fig 5.3: Algorithm for control of active suspension in the area which the rover can't traverse

5.2.1 ロール方向の制御

車体のロール方向の傾きは、前脚は車体にフリースジョイントで繋がっているため、後脚の高さ成分のみにより決定される。ロール方向の制御はアクティブサスペンション θ_{leg3} 、 θ_{leg4} を変化させることで、後脚の高さ成分を変えて車体を平行にすることによって行われる。そこで θ_{leg3} 、 θ_{leg4} を制御するのだが、ロール方向の傾きが0となるような θ_{leg3} 、 θ_{leg4} の解は無数に存在するので、もう一つ拘束条件が必要である。そこで、登坂など走破できない場合はなるべく後輪を重心から遠ざけた方が良く、重心が低い方が良いという拘束条件を加える。

例として、Fig.5.4 のような地形にいる時のロール方向の制御法について考える。

まず接地点が高い脚の方を、最も低い座高でかつ重心から遠ざかるようにアクティブサスを変更する。この場合、

$$\theta_{leg3} = -\frac{\pi}{3} \quad (5.1)$$

その後、 θ_{leg4} を制御することで、左右の高さを調節する。解が無い場合、車体のロール方向の傾きを最も0に近くさせるため、接地点が低い方の脚を、最も高い座高になるようにアクティブサスを変更する。この場合、

$$\theta_{leg4} = -\frac{\pi}{6} \quad (5.2)$$

反対の場合も同様である。

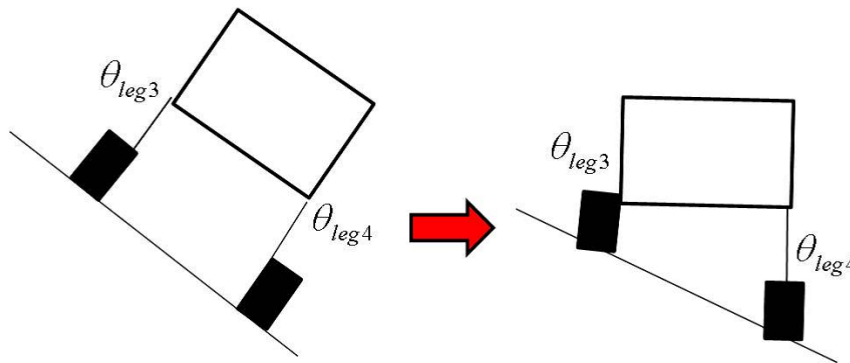


Fig 5.4: Control by active suspension (roll)

5.2.2 ピッチ方向の制御

後脚の制御後、なおも登坂できない場合には、更に牽引力を上げるため、前後の接地荷重を等しくする。そこで、次のような簡易二次元モデルを用いて、各車輪の接地荷重が等しくなるように、前脚のアクティブサス θ_{leg1} 、 θ_{leg2} の制御を行う。Fig.5.5 にローバの二輪モデルを示す。ここで、後輪と中輪を一つにし、二輪モデルにしたのは、後輪と中輪の

接地荷重の配分がフリージョイントで繋がっているために制御できないからであるのと、計算の簡略化のためである。

次式を用いて、前後の接地荷重の比が2:1になるような制御を行う。なお、Fig.5.5の $\theta_{1\alpha}$ 、 $\theta_{2\alpha}$ 、 $l_{2\alpha}$ 、 $l_{1\alpha}$ 、 $l_{3\alpha}$ 、 $l_{5\alpha}$ 、 $\theta_{1\beta}$ 、 $\theta_{1\gamma}$ 、 $l_{4\alpha}$ 、 $\theta_{3\alpha}$ の導出方法は、Fig.4.6と同様、式(4.30)～式(4.42)を用いる。車体の中心から地面までの高さ h は、

$$h = \frac{h_{body}}{\cos(\alpha)} + l_{1\alpha} \sin(\theta_{4\alpha}) + (L_2 - l_{1\alpha} \cos(\theta_{4\alpha})) \tan(\theta_x) \quad (5.3)$$

となり、前輪から車体の中心から地面に降ろした垂線 h までの距離 L_1 、後輪から車体の中心から地面に降ろした垂線 h までの距離 L_2 は、

$$L_1 = l_{3\alpha} \cos(\theta_{3\alpha}) + 2w_{body} \cos(\alpha) + h_{body} \sin(\alpha) \quad (5.4)$$

$$L_2 = l_{1\alpha} \cos(\theta_{4\alpha}) + 2w_{body} \cos(\alpha) - h_{body} \sin(\alpha) \quad (5.5)$$

で求まる。そして

$$L = L_1 + L_2 \quad (5.6)$$

とすると、各車輪の接地荷重は、

$$N_1 = \frac{L_2}{L} mg \cos(\alpha) + \frac{h}{L} mg \sin(\alpha) \quad (5.7)$$

$$N_2 = \frac{L_1}{L} mg \cos(\alpha) - \frac{h}{L} mg \sin(\alpha) \quad (5.8)$$

となる。

そして、前後の接地荷重の比が2:1になるように、

$$\xi = 2N_1 - N_2 \quad (5.9)$$

とし、 ξ が0となるような θ_{leg1} 、 θ_{leg2} を求める。

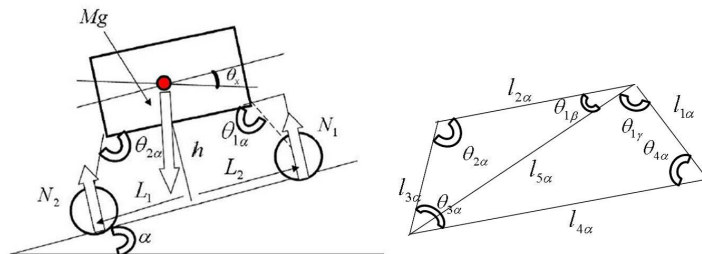


Fig 5.5: Control by active suspension (pitch)

5.3 シミュレーション検討

（ノミナルの状態では走破不可能の領域）

5.3.1 地形とローバの姿勢との関係

本研究では地形情報を既知としたシミュレーション検討を行った。地形情報と、ローバの位置、アクティブサスの $\theta_{leg1} \sim \theta_{leg4}$ の角度がわかると、ローバの姿勢、フリースポイントを一意にもとめることができる。既知の情報と未知数を Table 5.1 に示す。ワールド座標系で見た各車輪の接地点 \vec{p}_i は、ローバの中心から見た座標系である式 (4.1) ~ (4.15) と、ワールド座標系での中心位置座標 x_0, y_0 とワールド座標系でのヨー角 θ_z によって、

$$\vec{p}_i = \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{z}_i \end{bmatrix} = R_{\theta_z} \vec{p}_i + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

$$R_{\theta_z} = \begin{bmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & 0 \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

となる。また、各車輪の接地点の z 座標である \dot{z}_i は、地形情報より、

$$\dot{z}_i = k_1(\dot{x}_i)\dot{x}_i + k_2(\dot{y}_i)\dot{y}_i + k_3(\dot{z}_i) \quad (5.12)$$

と表すことができる。これらの式により、各車輪の接地点 $\dot{x}_1 \sim \dot{z}_6$ を求める。求まった式の各式の左辺を 0 とし、 $F_j (j \text{ は } 0 \sim 17)$ と置くと、

$$F_1 = x_1 \cos(\theta_z) - y_1 \sin(\theta_z) + x_0 - \dot{x}_1 \quad (5.13)$$

$$F_2 = x_1 \sin(\theta_z) + y_1 \cos(\theta_z) + y_0 - \dot{y}_1 \quad (5.14)$$

$$F_3 = z_1 + z_0 - k_{x1}\dot{x}_1 - k_{y1}\dot{y}_1 - c_1 \quad (5.15)$$

$$F_4 = x_2 \cos(\theta_z) - y_2 \sin(\theta_z) + x_0 - \dot{x}_2 \quad (5.16)$$

$$F_5 = x_2 \sin(\theta_z) + y_2 \cos(\theta_z) + y_0 - \dot{y}_2 \quad (5.17)$$

$$F_6 = z_2 + z_0 - k_{x2}\dot{x}_2 - k_{y2}\dot{y}_2 - c_2 \quad (5.18)$$

$$F_7 = x_3 \cos(\theta_z) - y_3 \sin(\theta_z) + x_0 - \dot{x}_3 \quad (5.19)$$

$$F_8 = x_3 \sin(\theta_z) + y_3 \cos(\theta_z) + y_0 - \dot{y}_3 \quad (5.20)$$

$$F_9 = z_3 + z_0 - k_{x3}\dot{x}_3 - k_{y3}\dot{y}_3 - c_3 \quad (5.21)$$

$$F_{10} = x_4 \cos(\theta_z) - y_4 \sin(\theta_z) + x_0 - \dot{x}_4 \quad (5.22)$$

$$F_{11} = x_4 \sin(\theta_z) + y_4 \cos(\theta_z) + y_0 - \dot{y}_4 \quad (5.23)$$

$$F_{12} = z_4 + z_0 - k_{x4}\dot{x}_4 - k_{y4}\dot{y}_4 - c_4 \quad (5.24)$$

$$F_{13} = x_5 \cos(\theta_z) - y_5 \sin(\theta_z) + x_0 - \dot{x}_5 \quad (5.25)$$

$$F_{14} = x_5 \sin(\theta_z) + y_5 \cos(\theta_z) + y_0 - \dot{y}_5 \quad (5.26)$$

$$F_{15} = z_5 + z_0 - k_{x5}\dot{x}_5 - k_{y5}\dot{y}_5 - c_5 \quad (5.27)$$

$$F_{16} = x_6 \cos(\theta_z) - y_6 \sin(\theta_z) + x_0 - \dot{x}_6 \quad (5.28)$$

$$F_{17} = x_6 \sin(\theta_z) + y_6 \cos(\theta_z) + y_0 - \dot{y}_6 \quad (5.29)$$

$$F_{18} = z_6 + z_0 - k_{x6}\dot{x}_6 - k_{y6}\dot{y}_6 - c_6 \quad (5.30)$$

となる。これらの式に、ニュートン法を用いることで、Table 5.1 の未知のパラメータを求める。

$$\begin{bmatrix} \frac{\delta F_1}{\delta \theta_x} & \frac{\delta F_1}{\delta \theta_y} & \frac{\delta F_1}{\delta z_0} & \cdots & \frac{\delta F_1}{\delta y_6} \\ \frac{\delta F_2}{\delta \theta_x} & \frac{\delta F_2}{\delta \theta_y} & \frac{\delta F_2}{\delta z_0} & \cdots & \frac{\delta F_2}{\delta y_6} \\ \frac{\delta F_3}{\delta \theta_x} & \frac{\delta F_3}{\delta \theta_y} & \frac{\delta F_3}{\delta z_0} & \cdots & \frac{\delta F_3}{\delta y_6} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \frac{\delta F_{18}}{\delta \theta_x} & \frac{\delta F_{18}}{\delta \theta_y} & \frac{\delta F_{18}}{\delta z_0} & \cdots & \frac{\delta F_{18}}{\delta y_6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_x \\ \Delta \theta_y \\ \Delta z_0 \\ \vdots \\ \Delta y_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F_1(X) \\ -F_2(X) \\ -F_3(X) \\ \vdots \\ -F_{18}(X) \end{bmatrix} \quad (5.31)$$

$$\theta_x = \theta_x + \Delta \theta_x$$

$$\theta_y = \theta_y + \Delta \theta_y$$

$$z_0 = z_0 + \Delta z_0$$

$$\vdots$$

$$y_6 = y_6 + \Delta y_6$$

Table 5.1: Parameter for simulation of the rover

information (already known)	symbol
angle of active suspension	$\theta_{leg1} \sim \theta_{leg4}$
ground surface	$\dot{z}_i = k_1(\dot{x}_i)\dot{x}_i + k_2(\dot{y}_i)\dot{y}_i + k_3(\dot{z}_i)$
center positon of the rover(x,y)	x_0, y_0
direction of the rover (yaw)	$\theta_z = 0$
information (unknown)	symbol
inclination of the rover (pitch、 roll)	θ_x, θ_y
angle of free joint	$\theta_{bogie1}, \theta_{bogie2}, \theta_{front}$
height of center position of the rover	z_0
contact point of each wheel	$\dot{x}_1 \sim \dot{z}_1$

5.3.2 シミュレーション条件（ノミナルの状態では走破不可能の領域）

シミュレーションでは、地形情報を与え、各地点での、ノミナルの状態とアクティブサス制御後の不整地走破性能の比較を行った。なお、アクティブサスの制御法はFig.5.3に示した制御アルゴリズムを用いる。なお、シミュレーション条件はTable 4.2のローバの各パラメータに以下のものを加えたものである。

1. ローバの出せる最大トルクは62.5Nである。
（提案したローバのモータの規格で最大電流を2.5Aを限度とした時の最大トルク）
2. 横滑りはないものとする。
3. 接地点は面接地ではなく、点接地である。
4. 地面は凹凸のない完全な平面である。
5. ロボットは静的である。
6. すべての車輪が地面に接地している。
7. 外力は重力のみである。
8. アクティブサス制御前と制御後の位置座標は変化しない。

5.3.3 シミュレーション結果（ノミナルの状態では走破不可能の領域）

シミュレーション結果をFig.5.6～5.10に示す。本シミュレーションでは、走破不可能である条件を、

1. 転倒してしまう場合 静的安定角が0以下 $\Psi < 0$
2. 登坂できない場合 牽引力 - 牽引負荷が0以下

としており、このどちらかでも満たす場合、黄色で示し、それ以外の走破可能である場所は黒色で示す。

(a) 最大傾斜角度 15 度の場合

結果をFig.5.6に示す。最大傾斜角度が15度の場合、ノミナルの状態でも全て走破可能であり、アクティブサス制御を行う必要性がないことがわかる。

(b) 最大傾斜角度 20 度、25 度の場合

結果をFig.5.7、Fig.5.8に示す。最大傾斜角度が20度、25度の場合、ノミナルの場合であると、走破不可能領域があるが、ロール方向のアクティブサスの制御を行うことで全ての領域が走破可能となる。

(c) 最大傾斜角度 30 度、35 度の場合

結果をFig.5.9、Fig.5.10に示す。最大傾斜角度が30度、35度の場合、ロール方向とピッチ方向のアクティブサス制御を行うことで、不整地走破性能の改善が見られた。また、走破不可能の箇所が若干あるが、これはローバがどんな姿勢であっても原理的に走破不可能な場所であると考えられる。

以上の結果より、アクティブサス制御により、ローバの本来持つ力を最大限に発揮させ、ノミナルの状態では走破不可能である箇所も走破可能となることがわかった。

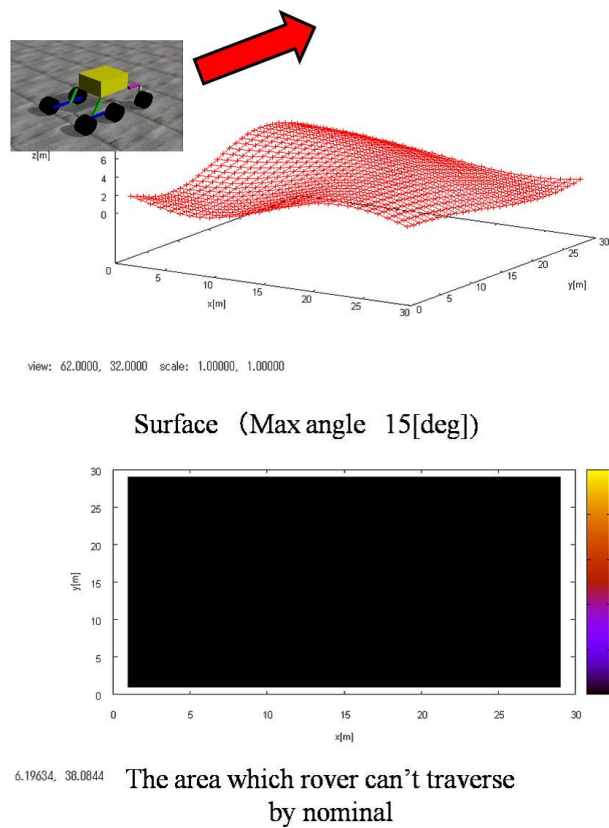


Fig 5.6: Comparison of the area which the rover can't traverse (max slope angle 15[deg])

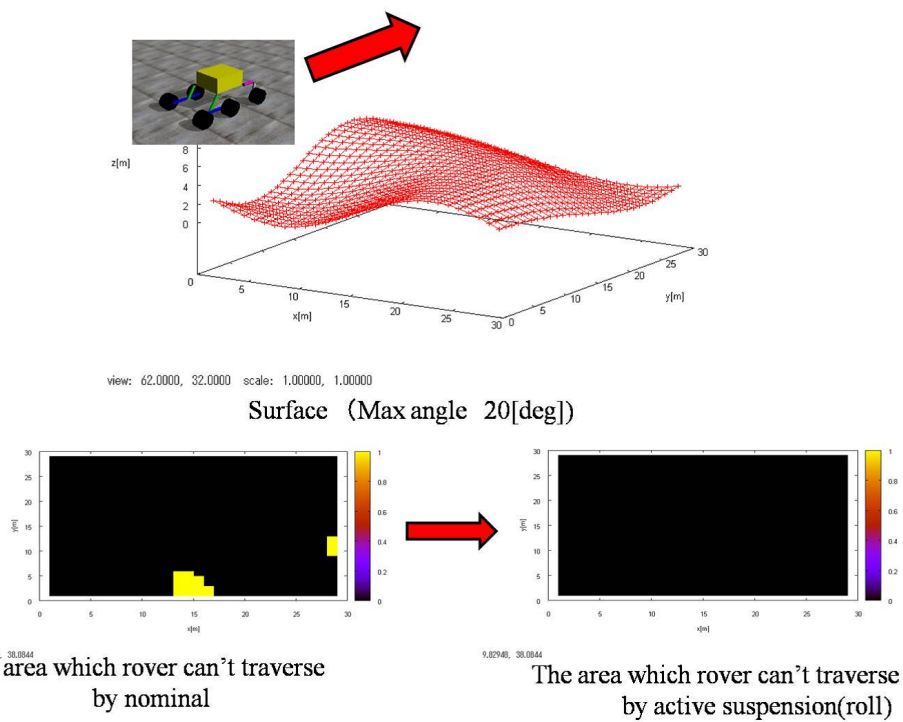


Fig 5.7: Comparison of the area which the rover can't traverse (max slope angle 20[deg])

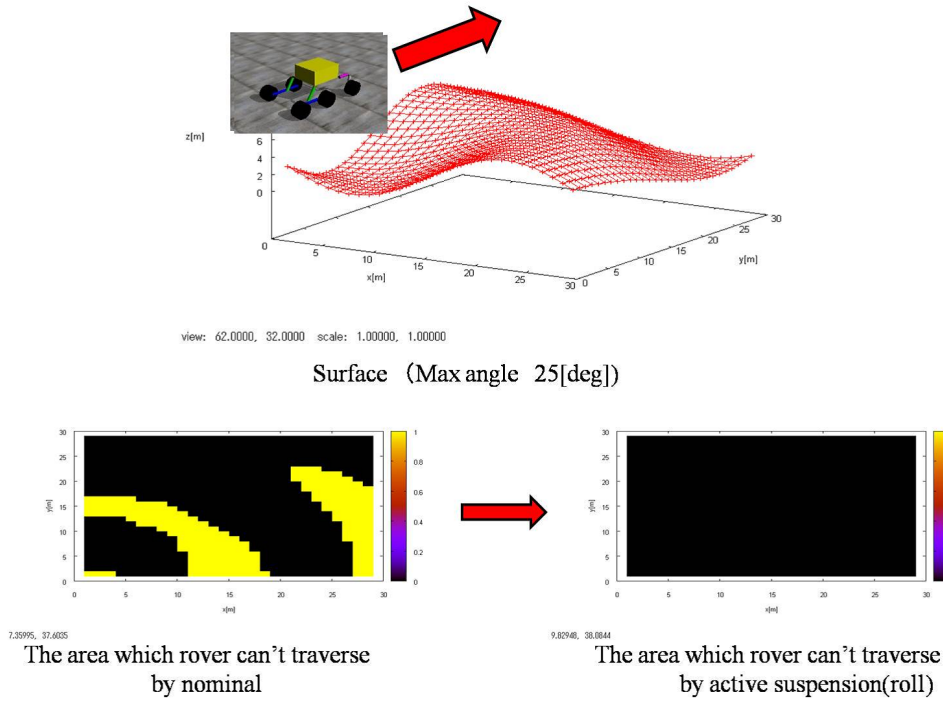


Fig 5.8: Comparison of the area which the rover can't traverse (max slope angle 25[deg])

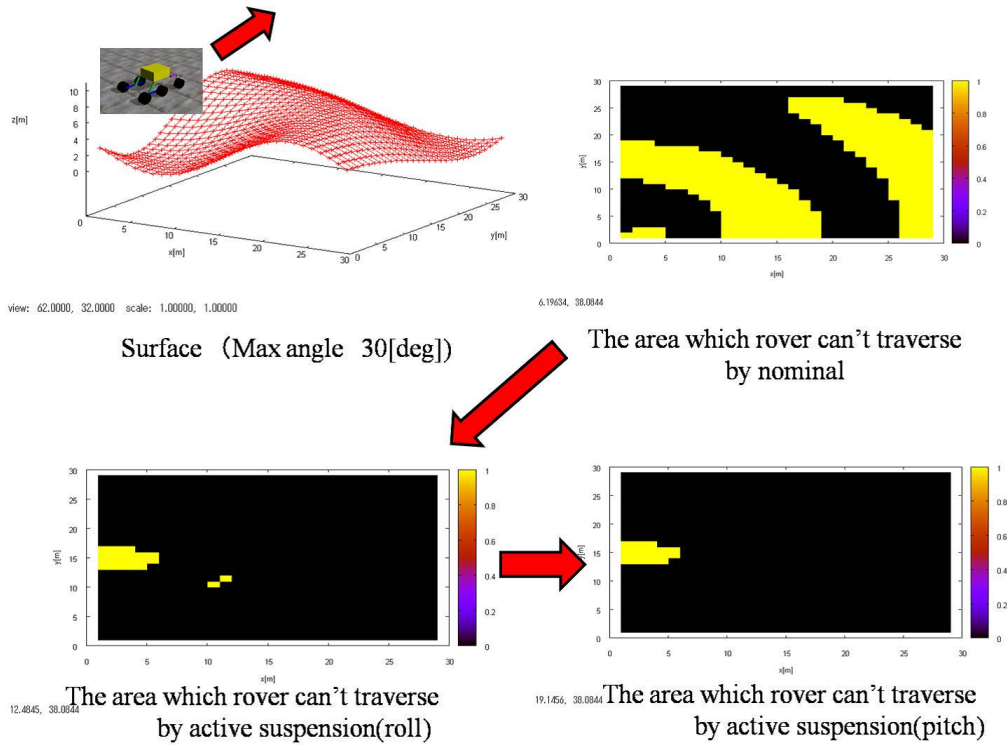


Fig 5.9: Comparison of the area which the rover can't traverse (max slope angle 30[deg])

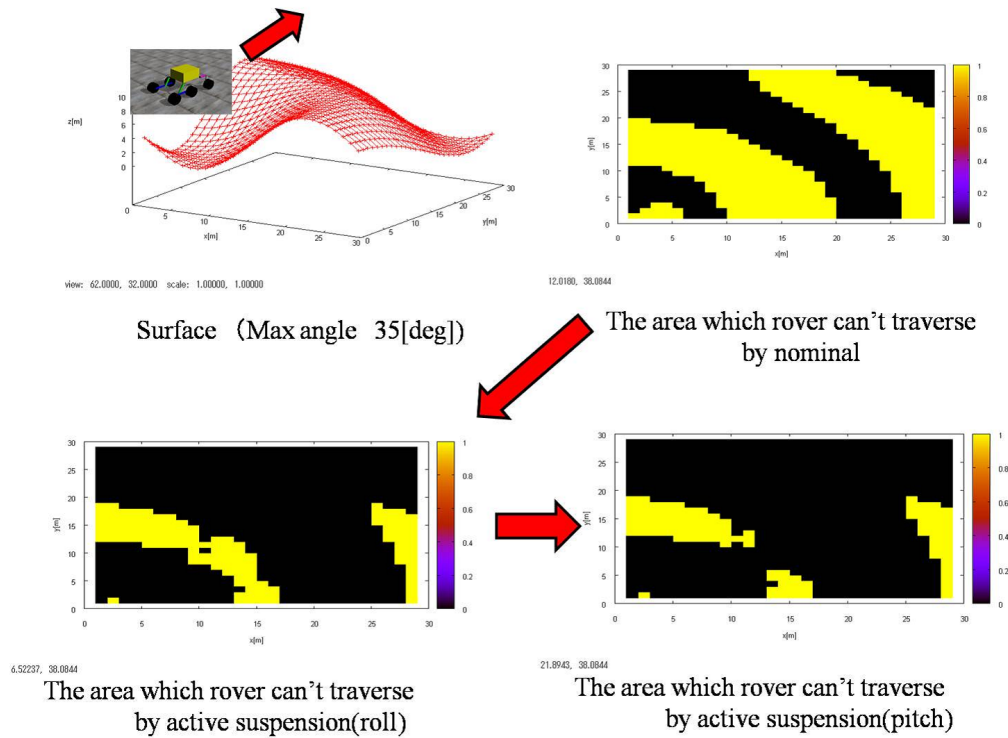


Fig 5.10: Comparison of the area which the rover can't traverse (max slope angle 35[deg])

5.4 アクティブサスの制御法 （ノミナルの状態で走破可能な領域）

前節より、アクティブサスを用いることにより、ノミナルでは走破不可能であった場所が、原理的に走破不可能である場所を除き、走破可能になることがわかった。そこで本節では、ノミナルで走破可能である場所でもアクティブサス制御を行い、更なる不整地走破性能の向上をはかる。

ノミナルで走破可能である場所でのアクティブサスの制御もロール方向とピッチ方向に分けて行う。ロール方向のアクティブサスの制御の例を Fig .5.11 に示す。ロール方向の制御は、ノミナルでは走破不可能であった領域と異なり、厳しい登坂では無いため、極端に後脚を重心から遠ざける必要はない。そこで、初期値はノミナルの状態とし、そこから接地点が高い方の脚を低くすることで車体のロール方向の傾きが0となる場所を探す。この場合、まず、

$$\theta_{leg4} = 0 \quad (5.32)$$

とし、 θ_{leg3} を変化させることで、ロール方向が等しくなる場所を探す。解が無い場合は、接地点の高い方の脚を最も低くし、接地点が高い脚の方を最も低い座高で後輪から遠ざかるようにアクティブサスを変更する。この場合、

$$\theta_{leg3} = -\frac{\pi}{3} \quad (5.33)$$

その後、 θ_{leg4} を制御することで、左右の高さを調節する。それでも解が無い場合、接地点が低い脚の方を最も高い座高になるようにアクティブサスを変更する。この場合、

$$\theta_{leg4} = \frac{\pi}{6} \quad (5.34)$$

ピッチ方向の制御はノミナル状態で走破不可能である領域の制御と同じ方法を提案するが、急な登り坂で無い限り、前輪はノミナルの状態より、前に動かすことが考えられる。そのため、路面粘着性の向上と静的安定角の向上は相関性があり、どちらの不整地走破性能も向上することが期待できる。このことから、ノミナル状態で走破可能である場所の場合、ピッチ方向の制御を常に行うことにする。制御アルゴリズムを Fig.5.12 に示す。

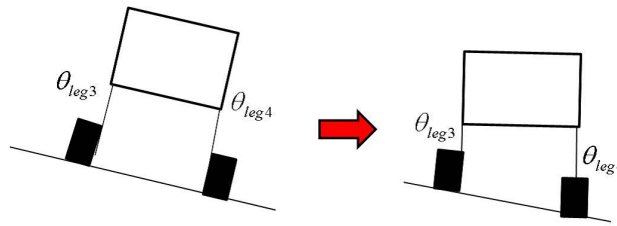


Fig 5.11: Control of active suspension2 (roll)

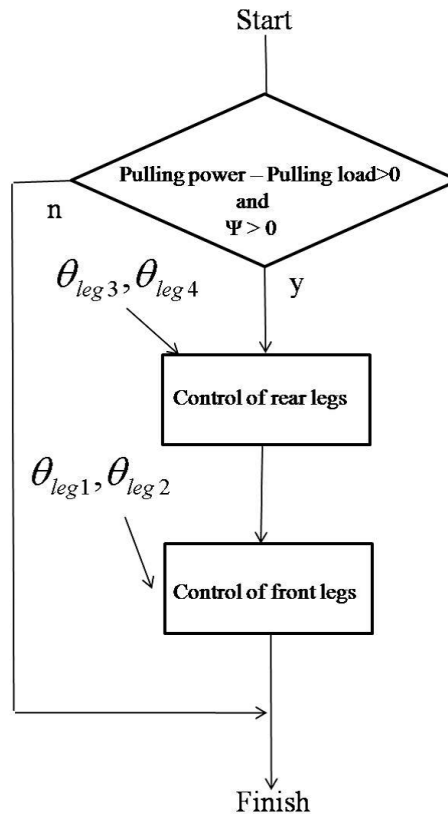


Fig 5.12: Algorithm for control of active suspension in the area which the rover can traverse

5.4.1 シミュレーション結果（ノミナルの状態で走破可能の領域）

ノミナル状態で走破可能の場所での、アクティブサスによる不整地走破性の向上を確認するため、シミュレーション検討を行った。結果を Fig.5.13～5.15 に示す。

シミュレーションでは5.3.2 節と同様の環境条件を用いており、最大傾斜角度 15 度、25 度、35 度として路面粘着性と静的安定角の比較を行った。黄色が最も不整地走破性能がよい領域で、黒に近づくにつれて不整地走破性が悪くなっていることを示す。

最大傾斜角度 15 度 (Fig.5.13)、25 度 (Fig.5.14)、35 度 (Fig.5.15) いずれの場合も、各不整地走破性能の向上が確認することができる。

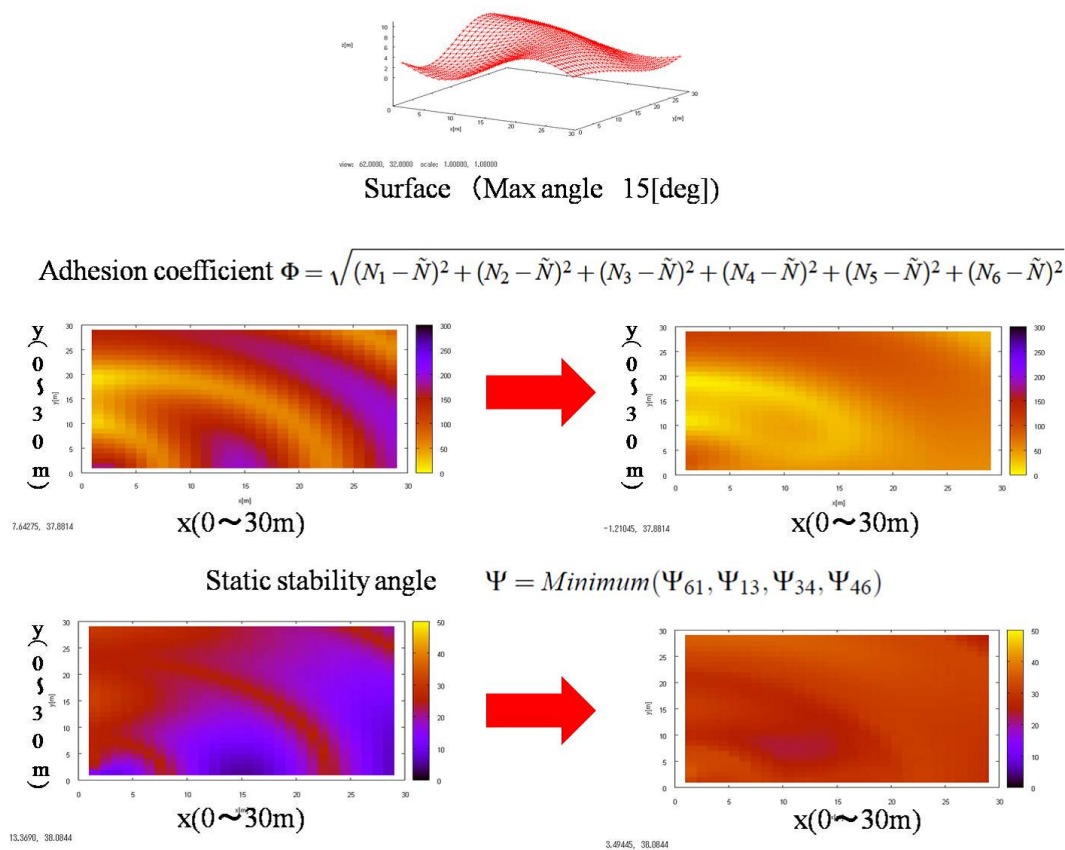


Fig 5.13: Comparison of traversability (max slope angle 15[deg])

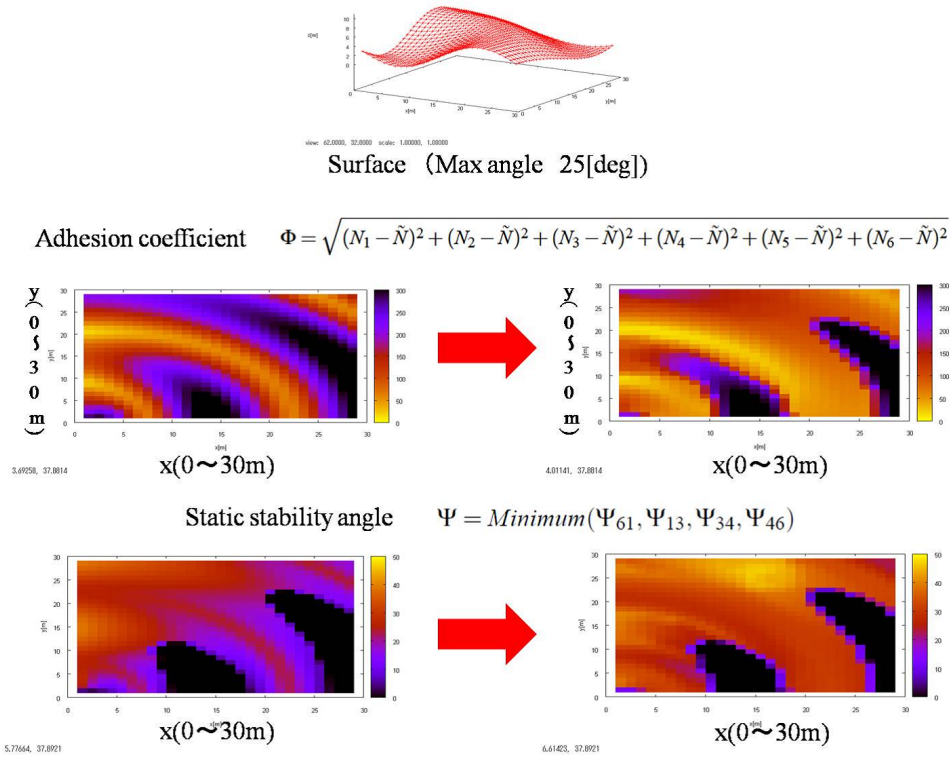


Fig 5.14: Comparison of traversability (max slope angle 25[deg])

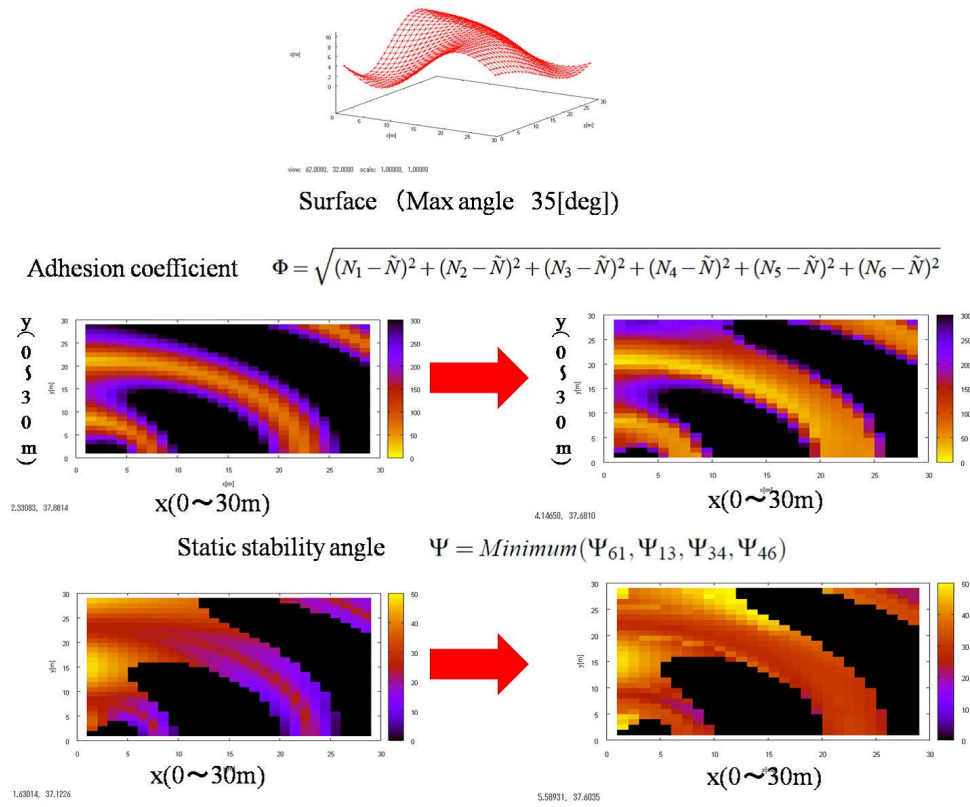


Fig 5.15: Comparison of traversability (max slope angle 35[deg])

5.5 アクティブサスの制御アルゴリズム

5.3 節では、ノミナルの状態では走破不可能な領域でのアクティブサスの制御法を、続く 5.4 節では、ノミナルの状態で走破可能な領域でのアクティブサスの制御法を提案し、いずれも不整地走破性能の改善が得られた。これらをまとめると、提案する制御アルゴリズムを、Fig.5.16 に示す。なお、ノミナルの状態で走破不可能である場所と走破可能である場所でのロール方向の制御法は前述の通り、若干異なる。

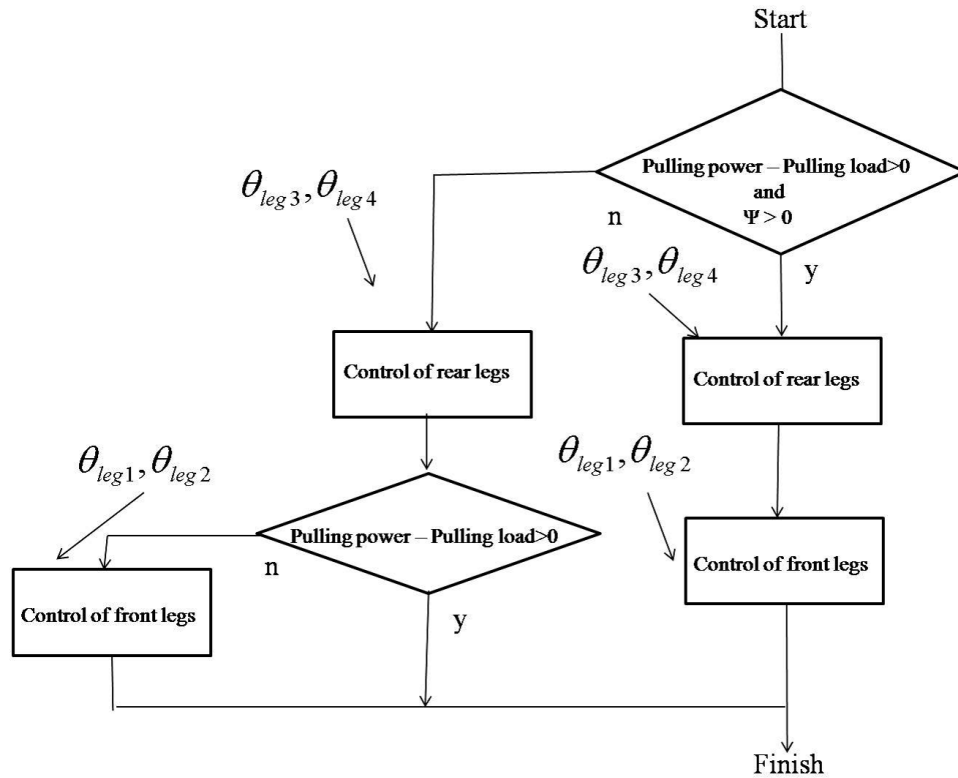


Fig 5.16: Algorithm for control of active suspension

5.6 ダイナミクスを考慮したシミュレーション

5.3 節、5.4 節のシミュレーション検討で、アクティブサス制御により、不整地走破性能が向上することが確認できた。しかしながら、5.3 節、5.4 節の結果はアクティブサスをその場で動かずに変化させたため、ローバがアクティブサス $\theta_{leg1} \sim \theta_{leg4}$ の変更中でも動くことや、動いている間に地形情報が変わることによっての変化が考慮されていない。そこで、実際の環境により近づくためにダイナミクスシミュレータを用いて、動いているローバに対してアクティブサスの制御を行った時の不整地走破性能の変化について検討した。

ダイナミクスシミュレータには、ODE(Open Dynamics Engine) を用いており、5.3 節のシミュレーションの環境条件に、以下の条件を加え、シミュレーションを行った。

1. サンプル周期を 0.5 秒とし、0.5 秒毎に、提案するアクティブサス制御アルゴリズムを用いて、 $\theta_{leg1} \sim \theta_{leg4}$ を決定する。
2. 目標地点を 10m 先とし、その過程での不整地走破性能を比較する。

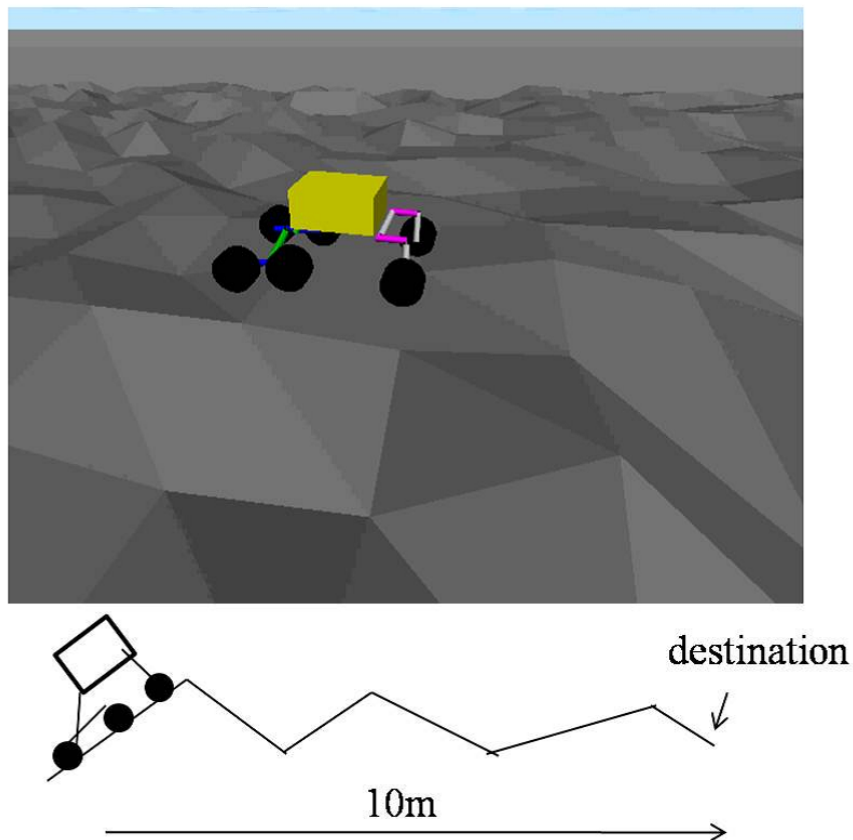


Fig 5.17: Simulation of the proposed rover

5.6.1 シミュレーション結果（ダイナミクスを考慮したシミュレーション）

静的安定角の変化の結果を Fig.5.18 に示す。縦軸に、静的安定角 [deg]、横軸に原点を 0 とした現在の位置座標 [m] をとっている。緑色の線がアクティブサスを使用した時の静的安定角で、赤色の線がノミナルの状態の静的安定余裕角である。アクティブサスにより、静的安定角が大きくなっていることがわかる。次に、路面粘着性の結果を Fig.5.19 に示す。縦軸に路面粘着性 [N]、横軸に現在の距離 [m] をとっており、同様に緑色の線がアクティブサス使用時で、赤色の線がノミナルの状態の時の路面粘着性である。こちらも静的安定角の結果と同様、アクティブサスにより、路面粘着性が向上していることがわかる。しかしながら、ノミナルの状態の方がいくらか優れている部分がある。これは最初に推測したように、アクティブサス変化中に地形情報が変化してしまったことが要因であることが考えられる。これらの結果より、アクティブサス制御による不整地走破性能向上を確認することができた。

しかし、先の地形を予測したアクティブサス制御が、更なる不整地走破性能の向上には必要であると考えられる。

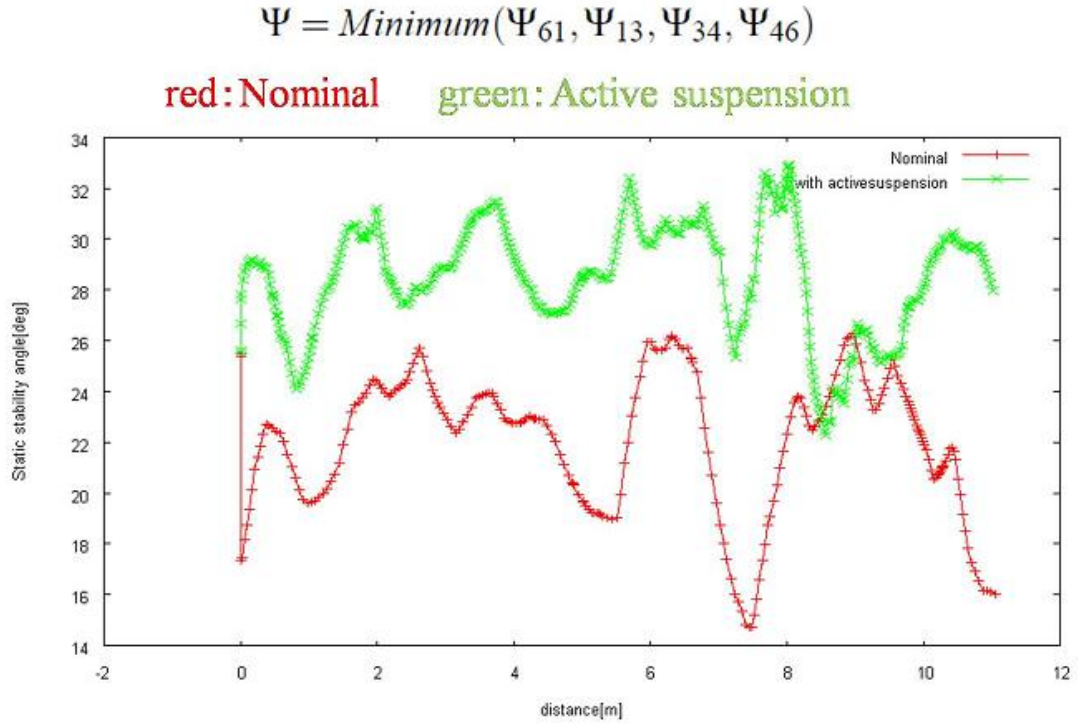


Fig 5.18: Simulation result (static stability angle)

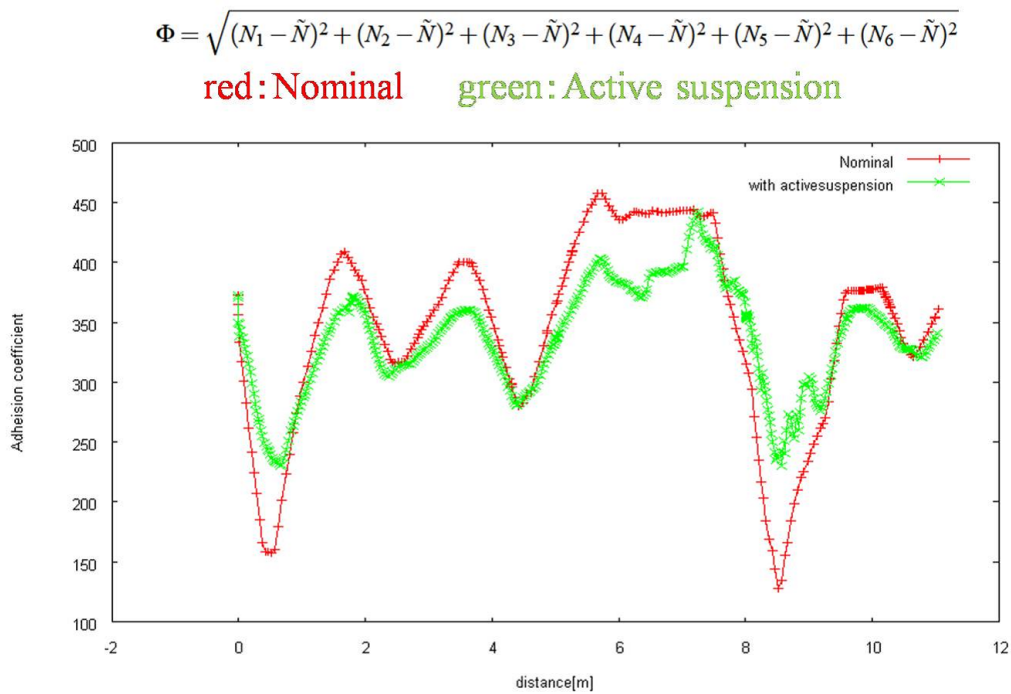


Fig 5.19: Simulation result (adhesion coefficient)

第6章 結論

本研究では、簡素でエネルギー効率の優れたアクティブサスペンションを用いたローバを提案し、各不整地での走破性能の指標である路面粘着性と静的安定角について評価を行った。また、アクティブサスペンションの制御法を提案し、不整地走破性がどの程度改善されるのかについて考察を行い、高い不整地走破性の改善が得られることがわかった。

6.1 研究の成果

本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- ・ 不整地走破性能は、提案したローバにより、大きく改善することが可能である。
- ・ 提案したローバにより、原理的に不可能であると思われる場所以外は走破可能となる。
- ・ 走破可能である場所でもアクティブサス制御を行うことにより、大きく不整地走破性能が改善可能である。
- ・ 少ないモータでアクティブサスを実現し、高い不整地走破性能を持つことをシミュレーションにより確認した。

6.2 今後の課題

以下に本研究の目的を達成するための、今後の課題を挙げる。

- ・ 不整地走破性能に関する他の指標の検討

本論文では、不整地走破性能の指標として、路面粘着性と安定性を用いたが、今後は段差乗り越え能力、スタック脱出能力など、他の不整地走破性能について検討していく必要がある。また、段差乗り越えやスタック脱出は静的ではなく、動的な動作によるものなので、ダイナミクスを考慮した動的な考察が必要であると考えられる。

- ・ 地形や地面特性の詳細な検討

本研究では地面は平らなものとし、ローバと地面との摩擦を考慮するのみであった。今後は地面の凹凸などの形状を考慮に入れる必要がある。また砂地の特性等、テラメカニクスの観点からの考察を行う。

- ・ 実機での詳細な検討

色々な環境下で実験を行い、ローバの性能を検討する必要がある。

参考文献

- [1] Astrogeology Science Center,
”<http://astrogeology.usgs.gov/HotTopics/index.php?/categories/15-Manned-Missions>”.
- [2] 矢野創, 岡田達明, 今村剛, “日本の太陽系探査ロードマップにおける陸海空ローバの役割”, 日本ロボット学会誌, vol.21, pp.462-467, 2003.
- [3] 吉光 徹雄, “小天体ローバ”, 日本ロボット学会誌, vol.21, pp.498-502, 2003.
- [4] NASA JPL, ”<http://www.jpl.nasa.gov/news/fact-sheets/mpf.pdf>”.
- [5] Mars Exploration Rover Mission, ”<http://marsrovers.jpl.nasa.gov/>”.
- [6] 吉光徹雄, 久保田孝, 中谷一郎, 足立忠司, 斉藤浩明, “小天体における探査ローバの移動方式”, 第4回ロボティクス・シンポジウム, 12B2, pp.93-98, 1999.
- [7] 中嶋秀朗, “四車輪型不整地移動ロボット RT-Mover の機構の検討”, 日本ロボット学会学術講演会, AC3E1-07, 2008.
- [8] 田口 幹, “回転足機構を用いた段差昇降機械の研究”, ROBOMECH2002, 2P1-F10, 2002.
- [9] 堀川和雪, “上移動用可変翼車輪ビークルのオンボード制御”, ROBOMECH2008, 2P2-A01, 2008.
- [10] 湯澤 友豪, “フリッパを有するクローラロボットのためのロール方向の転倒判定と転倒回避動作の提案”, Robomech2008 2P2-A12, 2008.
- [11] 多田隈建二郎, “横方向移動を可能にする円形断面クローラ”, ROBOMECH2008, 2P1-C14, 2008.
- [12] M.Krishna et al, “Tethering System Design for Dante ”, IEEE International Conference on Robotics and Automation Albuquerque, pp.1100-1105, 1997.
- [13] 広瀬茂男, “4足歩行型法面作業ロボット TITAN XI の開発-基本設計と脚機構の動作実験-”, 日本ロボット学会誌, vol.23, no.7, pp.847-857, 2005.
- [14] 妻木 俊道, “6脚歩行機械 landmaster3 の開発”, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.7, pp.851-860, 2006.
- [15] 吉岡健, “伸脚車輪ハイブリッド動作による ASTERISK の不整地移動”, ROBOMECH2007, 1A1-E07, 2007.
- [16] 遠藤玄, “ローラーウォーカーに関する研究-システムの構成と基本的動作実験-”, 日本ロボット学会誌, vol.18, no.2, pp.270-277, 2000.
- [17] 中嶋秀朗, “脚車輪分離型ロボットの未知不整地における基本移動制御手法”, 日本ロボット学会誌, vol.22, No.8, pp.1082-1092, 2004.
- [18] 広瀬 茂男, “「可変拘束機構」とその設計-特殊環境移動際行ロボットへの適応-”, 日本ロボット学会誌, vol.17, No.5, pp.615-619, 1999.
- [19] A.Schafer et al, “Robot Mobility Concepts for Extraterrestrial Surface Exploration”, IEEE Aerospace Conference, pp.1-14, 2008.

- [20] 久保田 孝, ”惑星探査ローバ”, 日本ロボット学会誌, vol.21, no.5, pp.468-471, 2003.
- [21] 稲垣 克彦, ”ロボットの内部設計と環境設計”, 日本ロボット学会誌, vol.17, no.5, pp.606-608, 1999.
- [22] 高橋 啓, ”重力環境を考慮した移動メカニズムの検討”, 第9回ロボティクスシオンポジア, 2004.
- [23] 黒田 洋司, ”不整地移動メカニズム”, 日本ロボット学会誌, Vol.21, No.5, pp.477-479, 2003.
- [24] 佐藤 雅紀, ”不整地走行機構を有する移動ロボットの試作および性能評価”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'03 講演論文集, 1P1-1F-C7, 2003.
- [25] NASA, <http://marsprogram.jpl.nasa.gov/missions/future/msl.html>.
- [26] 佐藤 理則 ”相似模型を用いた Rover の砂地走破性能に関する研究”, ROBOMECH2004, 1P1-L1-38, 2004.
- [27] R.Lindemann et al, ”Mars Exploration Rover Mobility Assembly DesignTest and Performance”, 2005 IEEE International Conference, vol.1, pp.450-455, 2005.
- [28] 飯塚浩二郎, ”車輪型探査ローバの走行システムに関する研究”, 学位論文, 2006.
- [29] NASA, ”Spirit and Opportunity”, <http://www.space.com/missionlaunches/090521-spirit-stuck.html>.
- [30] D.Harrison et al, ”Next Generation Rover for Lunar Exploration”, Aerospace Conference, 2008 IEEE, ver.2, pp.1-14, 2008.
- [31] Wilcox.B.H, ”ATHLETE:An Option for Mobile Lunar Landers”, Aerospace Conference, 2008 IEEE, ver.1, pp.1-8, 2008.
- [32] The Field Robotics center, ”<http://www.frc.ri.cmu.edu/projects/lri/scarab/index.html>”.
- [33] K.Iagnemma, Adam Rzepniewski, Steven Dubowsky, ” Control of Robotic Vehicles with Actively Articulated Suspensions in Rough Terrain,” Autonomous Robots 14, pp.5-16, 2003.
- [34] L.Draper et al, ”Design And Manufacture of a Full Size Breadboard Exomars Rover Chassis”, ASTRA 2006, Noordwijk, 2006.
- [35] B.Chen et al, ”Design of a high performance suspension for lunar rover based on evolution”, ActaAstronautica, 2008.
- [36] 中村 壮亮, 中谷 一郎, 久保田 孝, ” 重心移動による車輪型移動ロボットの不整地走破性向上”, 第24回日本ロボット学会学術講演会, 1G24, pp.95, 2006.
- [37] 浦山 泰英, ”月・惑星探査用車輪型ローバの移動性能に関する研究”, 修士論文, 2003.
- [38] 三輪 章子, ”テラメカニクスに基づく月・惑星探査ローバの登坂性能解析”, 第11回ロボティクスシンポジア, 6A2, 2006.
- [39] 石上 玄也, ”月・惑星探査ローバのステアリング特性に基づく走行力学の解析”, 修士論文, 2005.
- [40] Advanced Vehicle Lab, <http://homepage1.nifty.com/BROKEN/project/walk/memo.htm>
- [41] Karl Iagnemma, Steven Dubowsky, ” Mobile Robots in Rough Terrain - Estimation, Motion Planning and Control with Application to Planetary Rovers,” Springer, 2004.
- [42] 加藤 宙, ”不整地を移動する多脚型ロボットに関する研究”, 学位論文, 1999.

発表文献

- [1] 内木 孝将, 杉浦学, 久保田 孝:“ アクティブサスペンションを有する探査ロボットの走破性能に関する考察”, 第 27 回日本ロボット学会学術講演会, 1G3-04,2009
- [2] Takamasa Naiki,Takashi Kubota, ”Study on Mobility System with Active Suspension for Planetary Exploration”, i-SAIRAS2010, 2010 (発表予定)

謝 辞

本研究を進めるにあたりまして、とても多くの人々にご迷惑をおかけしながらもお世話になり、ご教授を賜りました。私は博士課程に進むので今後もお世話になるのですが、修士課程修了を一区切りとして、この場を借りて、皆様方に深く御礼申し上げます。

指導教官である久保田孝教授は、研究について打ち合わせの機会があるごとに適切なアドバイスを頂き、不十分な点、間違っている点については鋭い指摘を下さいました。また未熟である私に対して、インターンシップなど数多くのチャンスを与えて下さいました。そして、私の無知に対し、寛容に対応してくださったことを、ここに深く感謝致します。

橋本樹明教授には、ISSの際など適切な御指導、御指摘を頂きました。また、インターンシップへ行く際には、お忙しい中、推薦状を書いて下さり、ありがとうございました。ここに御礼申し上げます。

大槻真嗣助教には、度々研究室に来てくださり、直接的な指導をいただきました。お忙しい中、どうもありがとうございました。ここに深く感謝致します。

吉光徹雄准教授には、ISSの際には厳しい指摘を頂き、研究者としてどうあるべきかという姿を学ばされました。ここに厚く御礼申し上げます。

IAの足立忠司さんには何度も私のために足を運んで頂き、大変感謝しております。その節はありがとうございました。

秘書の小田真由美さんにも大変お世話になりました。ここに深く感謝致します。

研究室の先輩、後輩の皆様とは毎日顔を合わせ、苦楽をともにし、大変お世話になりました。この場を借りて、皆様方に深く御礼申し上げます。

博士課程の水上憲明さんには、この修士二年間に渡って、大変多くの御指導を頂きました。漫画や映画に対する知識もすごかったです。

杉浦学さんには、プログラミングなどに関しまして、数多くの御指導を頂きました。また、鉄道、地理、軍人、あらゆることに精通しており、知識の豊富さには驚きました。

永岡健司さんには、研究に対しての真面目な姿勢、丁寧な物腰、指摘の的確さなど研究者としての目標である姿を学ばされました。また大学時代のサッカー部の先輩でもあり、ISASの昼間のフットサルでも大変お世話になりました。

So Edmondさんには、深夜遅くまで熱心に研究する姿勢などについて学ばされました。また、とても穏やかな方で休憩時間にはよく私の拙い英語で会話をしてもらいました。

Ibrahim Mustafa Mehediさんには、バングラディッシュ料理などをご馳走して下さり、英語の勉強に付き合っ貰うなど大変お世話になりました。

Cedric Cocaudさんには、輪講前の英語の文法の確認などをしてもらったこと、大変良くしてもらったことを覚えております。またとても面白くユーモアなどについても学ばされました。

修士課程の田口勝也君には、同級生ということもあり、授業から研究まで、ずっと一緒に過ごしました。田口君がいなければ乗り越えられなかった壁もあったかもしれません。また、輪講前や発表前など大変な時期での落ち着きぶりにはいつも驚かされました。

Rodrigo Minghiniさんには、公私ともども大変お世話になりました。日本語が上手く、そして人に対する物腰が柔らかで、人として多くのことを学ばされました。またステーキやホットケーキなど研究室内で作って下さり、ありがとうございました。

研究室に新しい風を吹き込んでくれた後輩の出水義房君、高梨省吾君、肥田智仁君、藤原智史君

にも大変感謝しております。

最後に私に勉強する機会を与え、生活全般に関して援助してくれた家族に、心より感謝の意を表します。

付 録 A NASA AMES academy

2009年6月14日から2009年8月23日まで、NASA ames academyに参加し、Dr. Robert. S. Mccannの下、宇宙船のコックピット内での操縦者の目の動きに関する研究を行った。それについて報告する。

title:”The Assessment of the sensory and cognitive salience of Caution and Warning interface for Project Constellation Vehicles”

A.1 Background

NASA decided to retire the space shuttle because of cost, reliability, and deterioration, and now NASA is trying to develop a new space vehicle called ORION which will go to the ISS on the earth's orbit, and the Moon and Mars in the future.

Fig.A.1 shows a picture of the cockpit. There are many displays in the cockpit.

Fig.A.2 shows one of the displays in the cockpit which tells the pilot information that includes position, rotation, gravity, and the Caution and Warning system.

The Caution and Warning system is one of the most important interfaces in the cockpit, which gives the pilot a solution to an error, much like a troubleshooting, when something goes wrong.

The ISIS Lab developed two Caution and Warning systems called Elsie and Besi.

The Elsie system shows information about an error and we have to diagnose the solution by following the information. After finding the solution we change switches.

On the other hand, the Besi system diagnoses factors of error and navigates us to a solution automatically. We check it and change switches by following the information given by the system.

Despite the fact that the Caution and Warning system tells us perfect information, errors happen sometimes because of human mistakes, like loss of consciousness and misunderstanding the given information. Errors of human origin are inevitable. This raises questions. What are the factors of human error? How can we decrease human error?

One of the keys to the solution is eye movement. Eye movement may be able to explain human error like loss of consciousness. I therefore focused on eye movement and tried to make an accurate eye movement model.



Fig A.1: Cock pit in the ORION



Fig A.2: Display in the cock pit

A.1.1 The purpose of this research

The purpose of this research is twofold:

- To compare eye movement from human to human, using Besi and Elsie and each configuration.
- To use that information to make eye movement model.

A.2 Experiments and results

A.2.1 Experiments and results

I collaborated with real professional pilots and assembled eye movement data from them while they are performing tasks by using an eye tracking machine. Sometimes, their eye movement is fixed. These fixed points were called attention points. I assembled data to determine the various attention points.

For distributing the attention points, the display was separated into 13 pieces and I distributed each attention point to each place.(Fig.A.3)

I used three pilots' eye movement data in the same scenario. One of those was eye movement data from a pilot using the Besi Caution and Warning system. The other two of those were eye movement data from pilots using the Elsie Caution and Warning system.

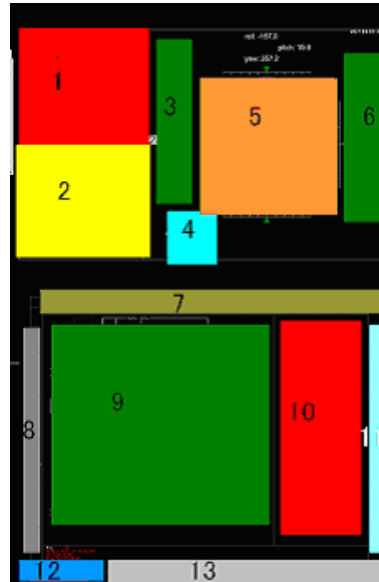


Fig A.3: The display separated 13 places

A.2.2 Comparison of ElsieA, ElsieB and BesiA by counting attention points

Fig.A.4 shows how many times the pilot's attention was at each place.

This result tells us that the pilot's attention was fixed on place 9 many times because place 9 has important information. There were small differences between the eye movement of each pilot, because each pilot is unique. For example, the pilot in the Elsie A trial often watched place 9. The pilot of Elise B seldom watched place 1, etc. Because of these differences we would be able to recognize whose eye movement were whose.

In order to compare the differences of eye movement between Elsie and Besi, we need to collect data of one pilot using both Elsie and Besi, because there are differences from human to human.

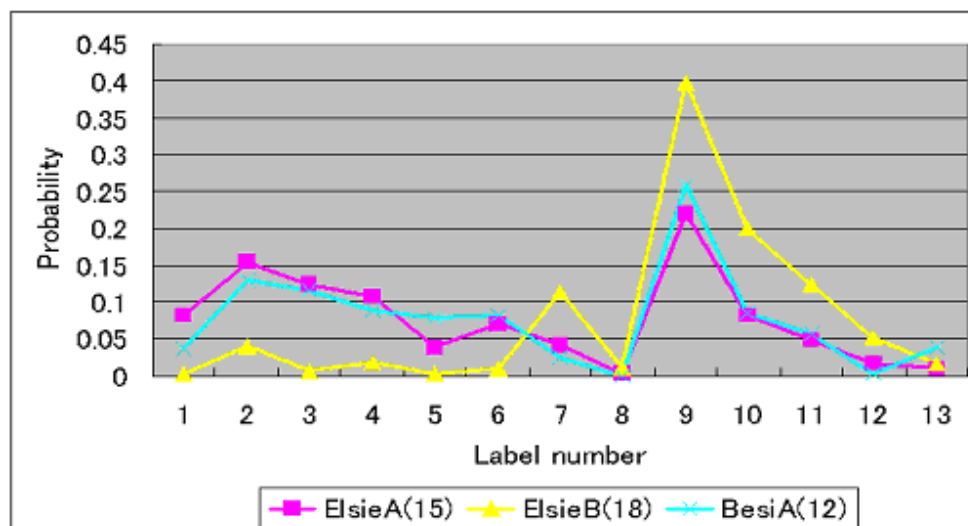


Fig A.4: Probability of the Pilot's eyes resting on each attention point

A.2.3 Comparing ElsieA, ElsieB and BesiA by using a transition map

I made a transition map. Transition maps plot the current attention point data with respect to the previous attention point. For example, if attention points changed from 1 to 2, this transition is labeled (1,2). I assembled transition data of (1,1) ~ (13,13) by ElsieA, ElsieB and BesiA. Fig.A.5, A.6, A.7, A.8 show transition maps of these. The X axis in these figures is the present attention point. The Y axis in these figures is the previous attention point. The squares colored white are places of high probability. The squares colored black are a places of low probability.

Fig.A.9 shows transition data of high probability.

This result meant that there were certain transitions which have a high probability of occurring and others with a low probability.

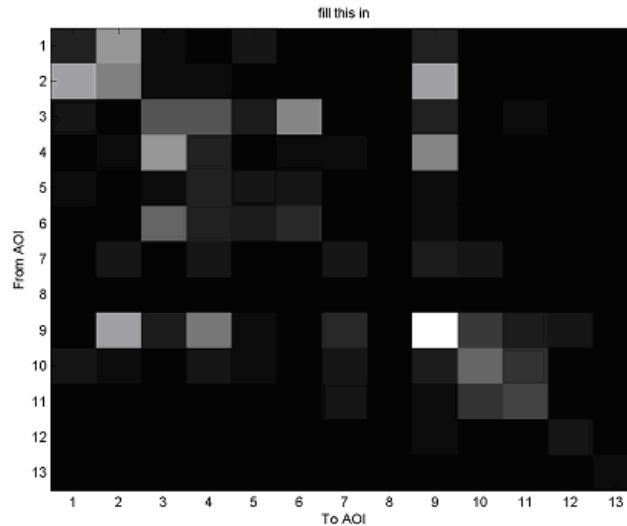


Fig A.5: Transition map (ElsieA)

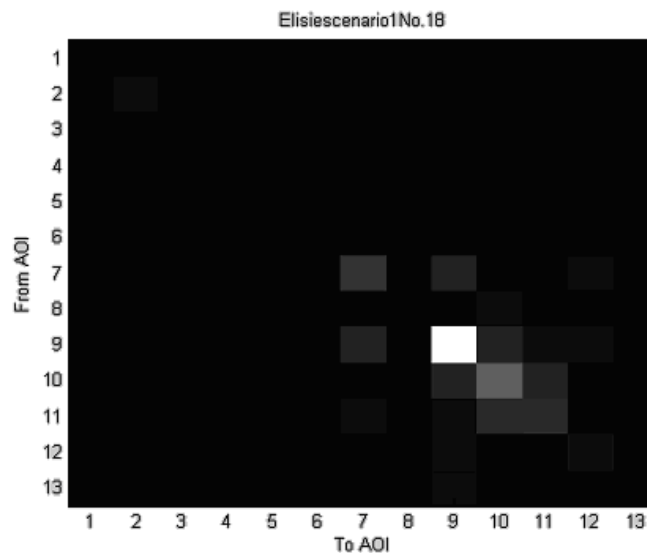


Fig A.6: Transition map (ElsieB)

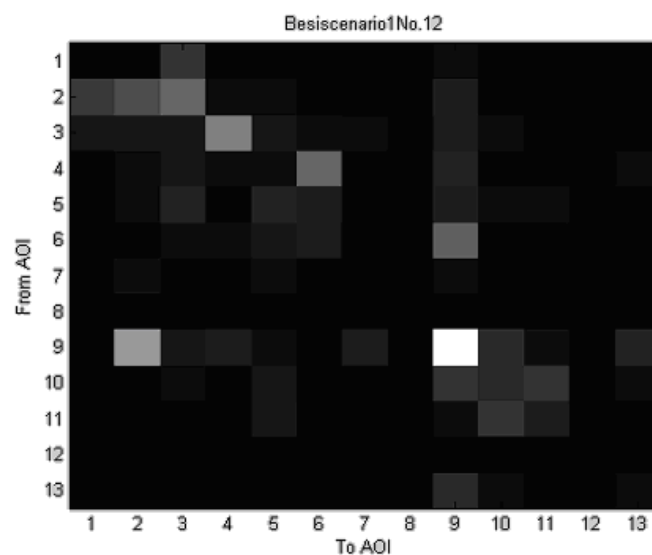


Fig A.7: Transition map (BesicA)

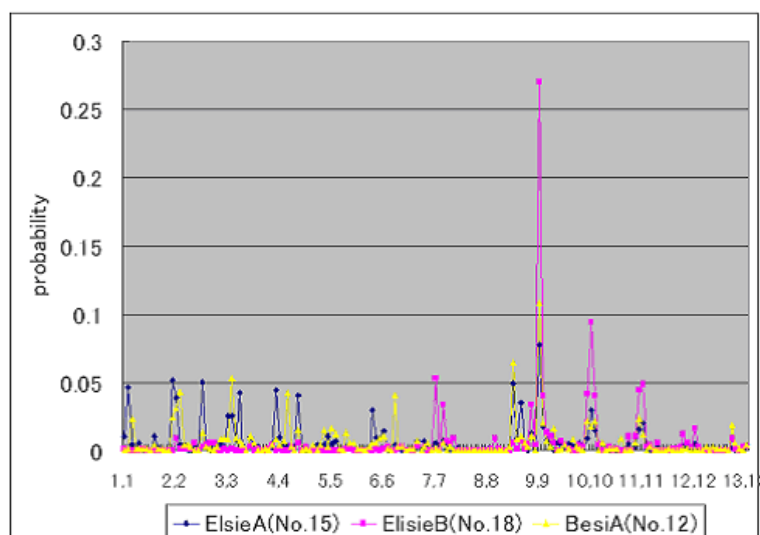


Fig A.8: Transition data

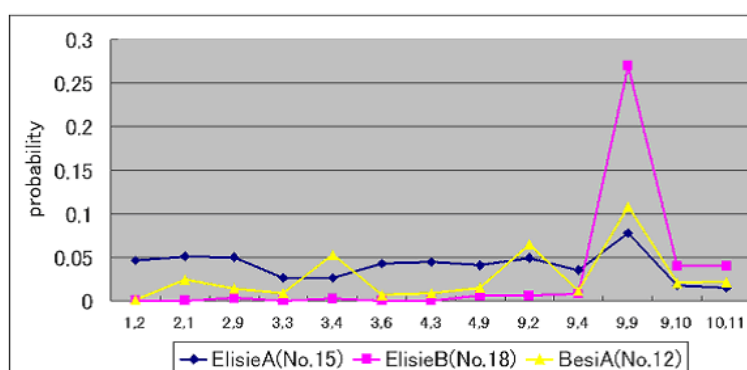


Fig A.9: Transition Data of High Probability

A.2.4 Comparing transition map within each configuration

It is possible that there is a difference in eye movement between each configuration, because the places which are important are different for each configuration. Fig.A.10, Fig.A.11, Fig.A.12, Fig.A.13 shows various configurations.

I assembled transition data of each configuration and made transition maps for ElsieA. Figs.A.14, A.15, A.16, A.17 show transition maps of each configuration in ElsieA. Again the squares colored white are places of high probability, and the squares colored black are places of low probability.

These result means that there are differences in eye movement for each configuration. To implement the eye movement model, we have to consider this difference.



Fig A.10: Configuration (ECLSS)



Fig A.11: Configuration (EPS Load Switch)

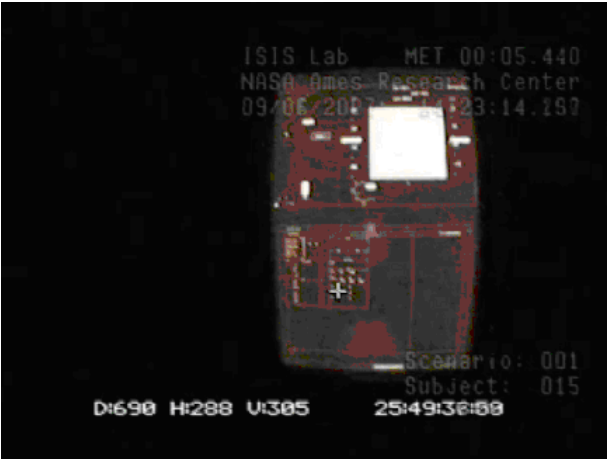


Fig A.12: Configuration (Fault Sum)

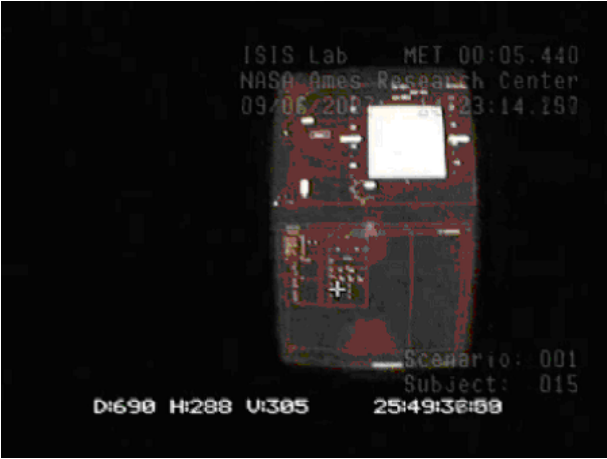


Fig A.13: Configuration (Fault Sum CL)

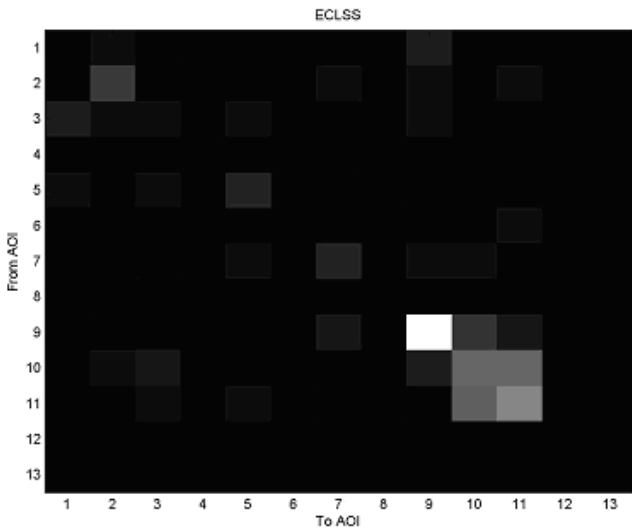


Fig A.14: Transition map (ECLSS)

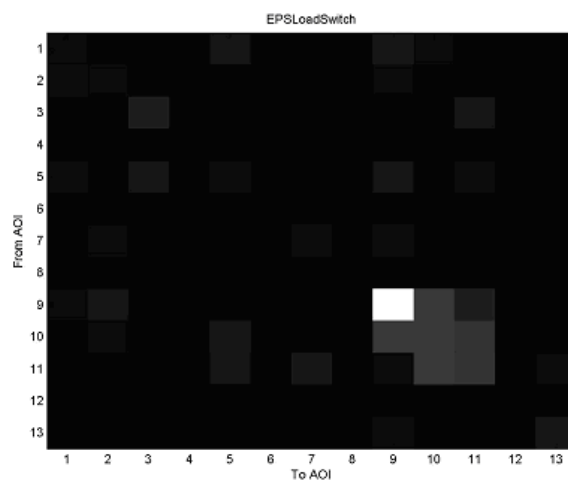


Fig A.15: Transition map (EPS Load Switch)

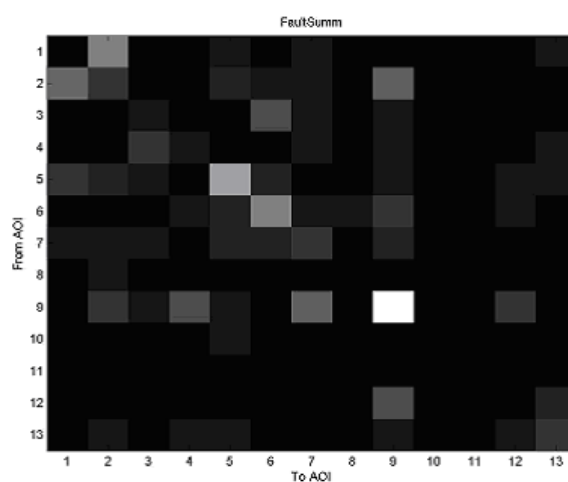


Fig A.16: Transition map (Fault Sum)

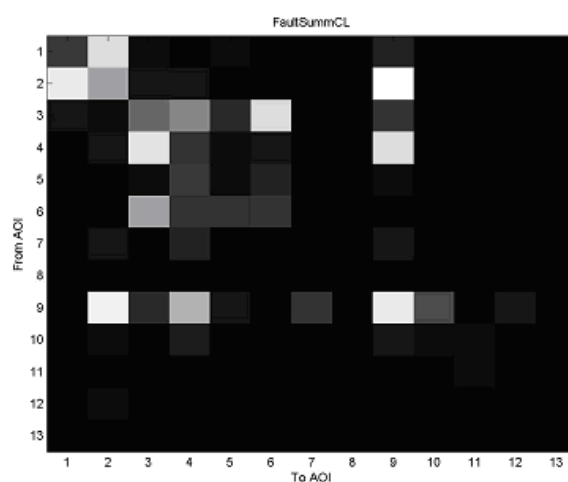


Fig A.17: Transition map (Fault Sum CL)

A.3 Making eye movement model

By calculating transition probabilities, I made a program of the eye movement model using the C programming language. Fig.A.18 shows a picture of the eye movement model.

The rectangle colored yellow is where pilot is focusing now, and percentages colored green are the probability that that place will be the next attention point.

If the space key is entered, the attention point is changed to a place referred to by the probability. The program is set so that in automatic mode the attention point is changed every 0.5[sec]. This program was made by considering only data of ElsieA 's probability and not considering each configuration. The duration spent looking at each attention point was not considered either.

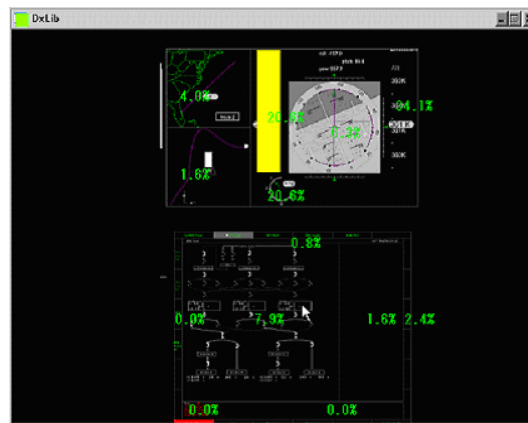


Fig A.18: Eye movement model

A.4 Conclusion and future works

A.4.1 Conclusion

The conclusions that can be drawn from these experiments are:

- There are differences of eye movement between each person and each person has unique eye movement.
- Eye movement of the pilot in each configuration are different because the places that are important are changed between each configuration.
- There is no big difference between Elsie and Besi, but to know this in more detail, we have to compare the eye movement model of Besi and Elsie using the same pilot.

A.4.2 Future works

Future works for developing the eye movement model are:

- To assemble numerous data sets using the various scenarios and many different pilots.
- To consider the duration of time spent at each attention point.

Developing an eye movement model is difficult, but it is not impossible to develop an eye movement model of each pilot and each scenario.

A.4.3 Comments

Many people helped me in my research. I really appreciated all of your help, and I can not thank you enough. I would like to thank my PI Robert. S. Mccan, Martine, Kelly, Miwa, Fritz, Steve, Mac, etc. I hope I 'll meet you again as a worker in the future.