

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：32702

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04031

研究課題名(和文) ロープテザーに対する宇宙エレベータークライマーの姿勢制御

研究課題名(英文) Attitude Control for a Space Elevator Climber for a Rope-type Tether

研究代表者

江上 正 (Egami, Tadashi)

神奈川大学・工学部・教授

研究者番号：40201363

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)： ロープテザークライマーの姿勢制御に関して、オムニホイール機構、2機CMG機構、リアクションホイール機構、スパイラル推進機構について理論的および実験的に検討している。

リアクションホイール機構は、常時高速回転しているCMG機構より機構が簡単、軽量で取り扱い易く、CMG機構より飽和するまでの時間は長くできるが、同様に飽和は避けられないことを確認している。

スパイラル推進機構は、クライマーを3輪可動ローラから脱輪防止版を用いた2輪可動ローラの機構に作り変えた結果、脱輪防止版は有効に働き、脱輪やローラの接触などの問題は解決されている。このためこれを用いた姿勢制御について検討が現在の課題である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ロープテザークライマーは、宇宙エレベーターを考える場合に大気圏で有利であり、スピナウト技術としてビル外壁や橋梁などのインフラ検査や送電線管理、災害時の通信、監視、移動体の近接撮影、農地やハウスの管理など地上付近における幅広い応用も見込めるなど大きな可能性を持っている。そして単独のロープで3次元的な動きが必要な多くの場面に対応可能であり、このようなクライマーの姿勢制御について機構的、制御的に検討を行うことは本研究の特色である。これにより宇宙エレベーター建設構想への貢献や、屋外、高層、過酷環境などでの検査用や災害時の基地、移動体の近接撮影などの特長を生かした新たな産業を創出できると考えている。

研究成果の概要(英文)： Regarding the attitude control of the rope tether climber, the omni-wheel mechanism, two CMG mechanisms, the reaction wheel mechanism, and the spiral propulsion mechanism are being studied theoretically and experimentally.

The reaction wheel mechanism is simpler, lighter and easier to handle than the CMG mechanism, which is constantly rotating at high speed, and it can take longer to saturate than the CMG mechanism, but it has been confirmed that saturation is unavoidable as well.

As a result of changing the climber from a three-wheel movable roller to a two-wheel movable roller mechanism using a derailment prevention plate, the spiral propulsion mechanism works effectively, and problems such as derailment and roller contact are solved. Therefore, the current issue is to study attitude control using a new climber.

研究分野：ロボティクス、メカトロニクス、制御工学

キーワード：宇宙エレベーター クライマー ロープテザー 姿勢安定化制御 CMG リアクションホイール スパイラル機構

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

宇宙エレベーターとは、3万6千km上空の静止軌道ステーションさらにはその先の10万kmまでの高軌道ステーションと地上をテザーによりつないで、そのテザーをクライマーが昇降するというものである。現在の唯一の宇宙移送手段であるロケットと比較して、低コストで宇宙に行ける点、途中停止ができる点や静止軌道ステーション以遠のテザーを宇宙船のカタパルトとして使えば、遠心力を利用して燃料なく他の惑星に行けるなど計り知れないメリットがあるが、ケーブルの素材として想定されているカーボンナノチューブの長距離化などの課題のためまだ構想段階ではある。しかし、この長距離化の研究も進んでおり、クライマーのあるべき姿について、その機能や機構の面から工学的検討を進めておく必要性は高いと考えている。

宇宙エレベーターに関しては、2002年にNASAの研究機関がBradley Edward博士の実現案についてのレポートを発表し[1]、NASAの支援を受けたSpaceward財団が2005年から2009年まで主にレーザービームによるエネルギー供給を主眼としたクライマーの競技会を開催して1kmの昇降に成功している。日本でも2008年より宇宙エレベーター協会が活動を開始し、2009年度よりクライマーの機構を主眼とした宇宙エレベーター技術競技会（第5回大会からは宇宙エレベーターチャレンジ）を開催している。2012年には大林組による宇宙エレベーターの建設に焦点を当てた建設構想も発表されている[2]。

宇宙エレベーターのテザーとしてはベルトテザーとロープテザー、あるいはこれを組み合わせたハイブリッドテザーが想定されている。宇宙空間ではスペースデブリなどとの衝突により損傷しても、損傷箇所を補修しやすいベルトテザーが有利とされているが、大気圏内では風などの環境の影響からロープテザーが有利とされており、最近では宇宙空間ではベルトテザー、大気圏内ではロープテザーといったように使用高度に合わせて最適な形状を使用するハイブリッドテザーも構想されている。しかし、ロープテザーはベルトテザーに比べて、滑りやすく、テザー周りの姿勢制御が難しいという問題点が明らかになってきている。

2. 研究の目的

本研究ではロープテザークライマーのテザー周りの姿勢制御について理論的および実験的に検討する。申請者は現在までに、ベルトテザーに関して押し付け力調整機構の開発を行い、すべり防止などに効果を確認している。ロープテザーに対してもローラの同期化制御やCMG（コントロール・モーメント・ジャイロ）による姿勢制御を行ってきており、ローラの同期化については実現しているが、CMGによる姿勢制御については長距離昇降においてジンバル（フライホイールの回転台）が90度傾くと制御不能となる飽和特異点の問題が解決していない[3]。本研究では、各種の機能をユニット化したユニット型クライマーを開発し、短距離であれば姿勢制御が可能であったCMGの長距離走行における飽和回避方法の究明と、安定した昇降を実現する機構の開発が目的である。

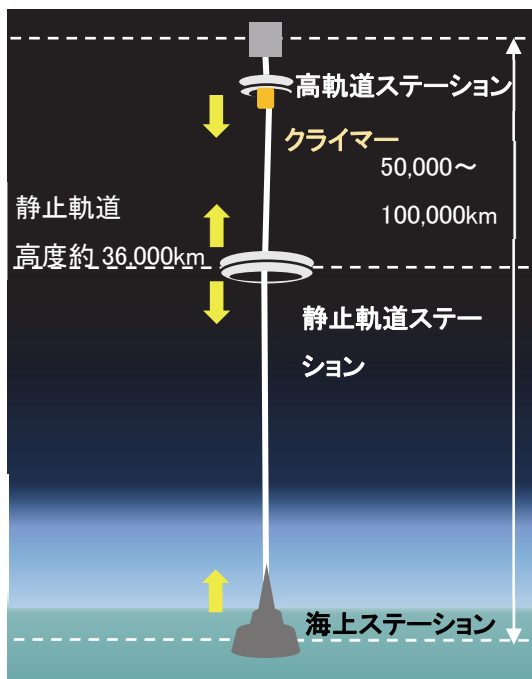


図1 宇宙エレベーターの構想

3. 研究の方法

本研究では、ロープテザークライマーの姿勢制御に関して、具体的にオムニホイールを用いた機構、2機CMG機構やリアクションホイール機構、スパイラル推進機構などについて理論的および実験的に検討し、有効性を明らかにする。

オムニホイールは全方向移動車両などの車輪として用いられることが多いが、これをロープテザーに対して直交するように用いることにより、クライマーがロープ周りに回転することや、CMGやリアクションホイールが飽和することを抑制することをめざす。

CMGやリアクションホイールについては、人工衛星などでよく用いられている。本研究では宇宙エレベーターに適したCMGを提案し、姿勢を一定に保つことには成功しているが、長距離昇降においてジンバルが90度傾くと制御不能となってしまう飽和の問題が解決できていない。このため図2に示すように2機のCMGを設置し、飽和復帰動作時のCMGはユニットから切り離してもう一つのCMGで姿勢を保持し、それらを交互に繰り返すことにより、連続してクライマーの姿勢を保持する2機CMG機構を提案し、機構や制御について検討する。またリアクションホイール機構については、常時高速回転しているCMG機構より機構が簡単、軽量で取り扱い易い利点があるため、飽和の問題も含めて検討する。

スパイラル推進機構はテザーに対してローラを傾かせて螺旋走行をさせるものであり、本研究ではこのローラの傾きを可変にし、ローラの動きで姿勢制御が可能になる。さらにクライマーは通常、始動時に大きなトルクが必要となり、そのトルクに合わせた大容量モータが必要になるが、ローラを螺旋状に走行させることにより、少ないトルクでも昇降が可能になり、定常状態の必要トルクに合わせた小容量モータを用いることもできる。ローラの動きと姿勢の関係などを理論的、実験的に検討し、姿勢制御を実現する。

これらの機構は単体の機構で長距離走行を対象としたシミュレーションや実験を重ねた後、ユニットを組み合わせた効果についても検討を行う。

4. 研究成果

オムニホイール機構については、市販のオムニホイールを用いて基本的な装置を製作して検討を行った。その結果、数種類のオムニホイールで検討を行ったが、いずれもオムニホイール表面の凸凹がロープに食い込んで破損してしまった。通常のオムニホイールは水平面を走行することを想定しているため、ロープテザー昇降に用いるためにはこれに適した形状のものを構想しているが製作は困難で、現状では保留としている。

2機CMG機構については、飽和復帰機能の効果を検証するため、図3に示すような図2のCMGユニットを搭載したクライマーを製作した。そして、これを神奈川大学23号館南側壁面の屋外実験場に垂直に張られた25mのロープテザーで昇降実験を行った。クライマーの外形寸法は1400×300×450mm、機体質量は約20kgである。CMGユニットは飽和復帰機能を有するCMG2機によって構成されており、CMGはフライホイールと2自由度のジンバルによって構成されている。フライホイールはジンバル1で支持され、さらにそれをジンバル2で支持する構造となっている。また、CMGユニットは飽和復帰動作時、無励磁作動電磁ブレーキによってジンバル2を受動回転させ、クライマーへの影響の軽減を図る。ジンバル2はスリップリングを導入す

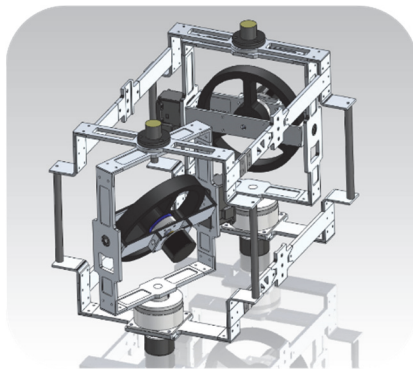


図2 2機CMGユニット

ること配線の制限なく回転できるようになっている。

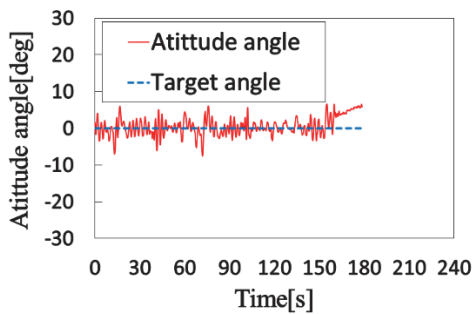
2機のCMGのジンバル1の初期角度は共に 0° とし、飽和から遠い一方のCMGが姿勢制御をしつつ、もう一方には常に飽和復帰を行わせ、CMGユニットが完全に飽和するまで姿勢制御を行わせた。制御系は外乱オブザーバに最適角度サーボ系を構成している。サンプリングタイム：50ms、ホイール回転数：約5000rpm、ジンバル復帰速度：0.3rpmとして昇降実験を行った。図4では復帰動作時にジンバル2を固定した場合の結果を示し、図5では復帰動作時にジンバル2を回転制動させ、クライマーへの影響軽減を行った結果を示す。

ジンバル2を固定した図4では制御時間178s、昇降距離125mに対し、ジンバル2を回転制動させた図5では、制御時間236s、昇降距離164mとなっており、姿勢制御の持続時間が倍近く伸びていることがわかる。これはクライマーの姿勢制御の持続時間は、CMGの復帰時に発生するトルクの姿勢制御中のCMGへの影響を減少させることで増加することができるためと考えられ、この機構により持続時間は大幅に増加できたが、根本的な飽和回避方法については今後の課題である。

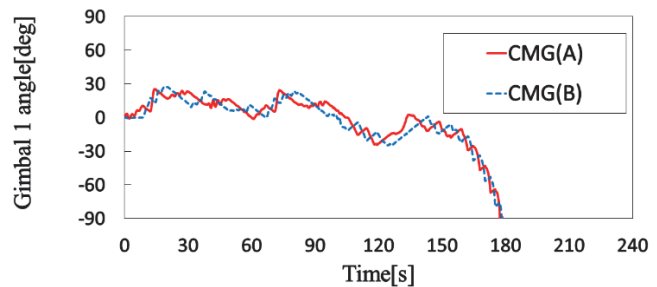
リアクションホイール機構については、図6に示すようにクライマーに新たに開発したリアクションホイールユニットを取り付け、昇降中の姿勢制御実験を行った。クライマーの総重量は14.83kgであり、クライマー下部にリアクションホイールを取り付け、往復で40mの昇降実験を



図3 CMGユニット搭載クライマー

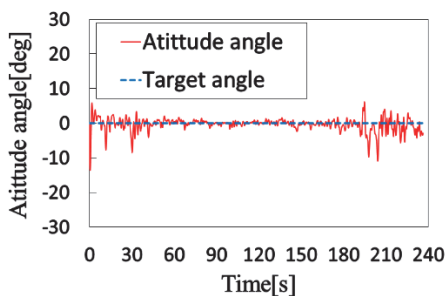


(a)姿勢角

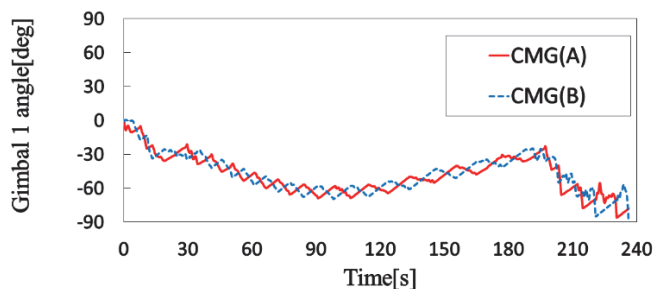


(b)ジンバル1角度

図4 CMGユニットの復帰動作時にジンバル2を固定した場合



(a)姿勢角



(b)ジンバル1角度

図5 CMGユニットの復帰動作時にジンバル2を回転制動させた場合

行った。クライマーは3m/sで上昇し、2m/sで下降するように制御している。制御系は外乱オブザーバに最適角度サーボ系を構成し、目標角は0°としてサンプリングタイム:50msとした場合の実験結果を図7に示す。姿勢制御を行うことで最大でも7°程度までに回転を抑制できていて十分に制御できていることがわかる。また、6秒から8秒付近でクライマーが他の時間よりも大きく振動しているが、これはクライマーが上端に到達しブレーキをかけて停止した際に発生した外乱を受けていると考えられる。このような急激な外乱に対しても十分の対応できていることよりリアクションホイールによるクライマーの姿勢制御は有効であるといえる。入力に注目しても最大で10V程度に収まっているため、入力にもまだ余裕があり、より大きな外乱に対しても対応可能であるといえる。



図6 リアクションホイールユニット搭載クライマー

リアクションホイール機構はCMG機構より機構が簡単、軽量で取り扱い易い利点はあるが、CMG機構と同じくリアクションホイールの時間が経つにつれて、入力は徐々に小さくなってしまい最終的に入力が最大になると姿勢制御ができなくなってしまう飽和の問題は避けられず、これが今後の課題となる。

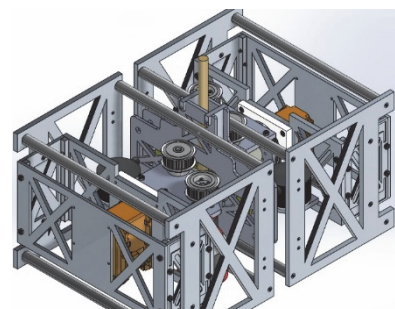


図8 脱輪防止版を用いた駆動ユニット

スパイラル推進機構は、始動時のトルク低減とともに高速で短時間のスパイラル運動により、クライマーの姿勢制御を行うことを目的としている。このためにスパイラル推進を実現するクライマーの機構について検討している。クライマーを3輪可動ローラから図8に示す脱輪防止版を用いた2輪可動ローラの機構に作り変えた結果、脱輪防止版は有効に働き、脱輪やローラの接触などの問題は解決されており、姿勢制御について検討が現在の課題である。

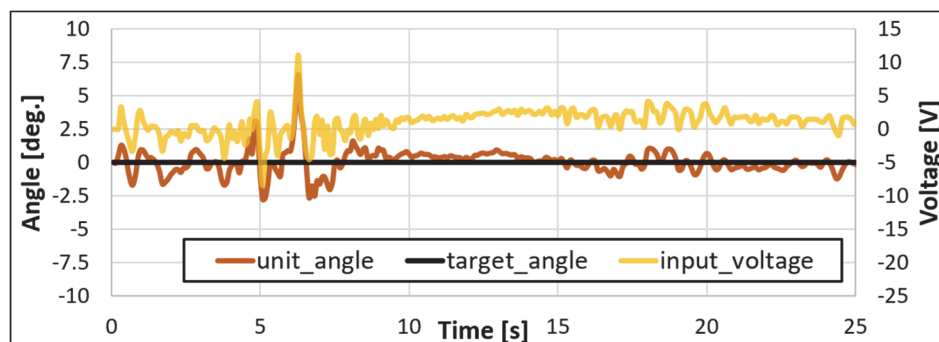


図7 リアクションホイールユニットによる姿勢制御

<参考文献>

- [1] B. C. Edward and P. Ragan : Leaving the Planet by Space Elevator, Lulu.com(2006)
- [2] 大林組プロジェクトチーム : 「宇宙エレベーター」 建設構想、季刊大林、No. 53、pp. 30-59(2012)
- [3] 江上正、長島祥、梅本和希、「CMGユニットを用いたロープ型宇宙エレベーター実験用クライマーの昇降安定化制御」、日本ロボット学会論文集、査読有り、Vol. 35、No. 1、pp. 47-54(2017)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sarieva Makpal, Graduate School of Engineering, Kanagawa University 3-27-1 Rokkakubashi Kanagawa-ku, Yokohama 221-8686, Japan, Yao Lei, Sugawara Kei, Egami Tadashi	4. 巻 31
2. 論文標題 Synchronous Position Control of Robotics System for Infrastructure Inspection Moving on Rope Tether	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 317 ~ 328
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2019.p0317	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 NAGATA Yuki, SUGAWARA Kei, EGAMI Tadashi	4. 巻 86
2. 論文標題 Application of a path control method using nearest-point search and target-point setting in the direction of moving for a ball-and-plate device	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 19 ~ 00286
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.19-00286	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Umemoto Kazuki, Endo Takahiro, Matsuno Fumitoshi, Egami Tadashi	4. 巻 30
2. 論文標題 Stability analysis of a control system with nonlinear input uncertainty based on disturbance observer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Robust and Nonlinear Control	6. 最初と最後の頁 4433 ~ 4448
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/rnc.4999	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 永瀬喬介、今井浩輝、吉川智康、江上正
2. 発表標題 リアクションホイールを用いた宇宙エレベータークライマーの姿勢制御
3. 学会等名 第51回計測自動制御学会北海道支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 永瀬喬介、後藤敬雄、江上正
2. 発表標題 江上研究室における宇宙エレベータークライマーの開発
3. 学会等名 第11回宇宙エレベーター学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 永瀬喬介、江上正
2. 発表標題 リアクションホイールを用いた宇宙エレベータークライマーの姿勢制御
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 永瀬喬介、江上正
2. 発表標題 リアクションホイールを用いた宇宙エレベータークライマーの姿勢制御
3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 後藤敬雄、高橋亮、江上正
2. 発表標題 インフラ検査用昇降機の開発
3. 学会等名 第52回計測自動制御学会北海道支部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋亮、後藤敬雄、江上正
2. 発表標題 インフラ検査用H型クローラクライマーの開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋亮、江上正
2. 発表標題 インフラ検査用クローラクライマーの開発
3. 学会等名 神大テクノフェスタ2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野中祐太郎、中村俊貴、江上正
2. 発表標題 3次元ジナル運代を用いた架空送電工事支援ロボットの開発
3. 学会等名 第53回計測自動制御学会北海道支部学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 江上正他59名	4. 発行年 2020年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 478 (内14)
3. 書名 宇宙ビジネス参入の留意点と求められる新技術、新材料	

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 アイリス機構を用いた多指ハンドによる把持装置、ロボットアーム及び飛行体	発明者 江上正、谷田貝凌太	権利者 神奈川大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-187926	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 移動装置、運搬装置、作業支援装置及び移動作業装置	発明者 江上正、中村俊貴	権利者 神奈川大学、日本電設工業株式会社
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-203852	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------