T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	複数のテザーの投擲・巻取りとこれらへの懸垂により移動するロボットの開発 第１報，コンセプトの提案と基本機能の実験的検討
Title(English)	Development of a novel robot which locomotes by casting, winding and suspending on multiple tethers 1st Report: Its concept and experimental study of basic functions
著者(和文)	馬場星明, 菅原雄介, 遠藤央, 石井裕之, 武田行生
Authors(English)	Hoshiaki Baba, Yusuke Sugahara, Mitsuru Endo, Hiroyuki Ishii, Yukio Takeda
出典(和文)	第22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 予稿集, , , pp. 607-612
Citation(English)	, , , pp. 607-612
発行日 / Pub. date	2021, 12
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は公益社団法人計測自動制御学会に帰属します。 (c) 2021 The Society of Instrument and Control Engineers

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

複数のテザーの投擲・巻取りと これらへの懸垂により移動するロボットの開発 第１報，コンセプトの提案と基本機能の実験的検討

○馬場　星明（東京工業大学），菅原　雄介（東京工業大学），遠藤　央（東京工業大学），
石井　裕之（早稲田大学），武田　行生（東京工業大学）

Development of a novel robot which locomotes by casting, winding and suspending on multiple tethers 1st Report: Its concept and experimental study of basic functions

○ Hoshiaki BABA (Tokyo Tech)，Yusuke SUGAHARA (Tokyo Tech),
Mitsuru ENDO (Tokyo Tech)，Hiroyuki ISHII (Waseda Univ)，Yukio TAKEDA (Tokyo Tech)

Abstract : In this study, a novel robot that positions a camera for arboreal animal monitoring is proposed. It moves by repeating casting multiple tethers, hooking anchors to tree branches, suspending on tethers, controlling the tethers' length, and releasing the anchors. This paper describes the concept, principle of operation, experiments, and simulations to show the feasibility of its basic functions.

1.　緒言

動物行動学の研究では，カメラトラップを用いた環境調査が盛んであり [1]，中でも哺乳類を対象とした研究では樹上調査の重要性が指摘されている [2]．特に，樹上 10 m 以上の高所で周囲 1.5 m の障害物を除去してカメラを設置すれば，環境調査で得られる情報量が増加することが知られており [3]，樹上調査でしか観察できない動物もいる [5] が，設置に時間がかかるためこのような研究は数例にとどまる [4]．そこで，高所への移動が迅速に可能なロボットにカメラを取り付ければ，カメラの設置にかかる時間が削減できるため樹上調査に有用であると考えられる．

高所での環境調査を行うロボットには，Treebot[6] や SlothBot[7] などがある．Treebot はグリッパーの取り付けられたアームを複数搭載したロボットで，枝と幹の分岐点を自由に選択して移動していくことで高所へ移動する．しかし，ロボットを樹木の近くで運用することとなるため，枝葉が障害物となりやすい森林 [3] では，ロボットに取り付けられたカメラにより樹上調査を行うことは困難である．SlothBot は平面的に構造化された索道上を移動するロボットである．しかし現状では，索道の架設は人の手によって行われており [8]，高所への索道設置には多大な時間がかかると考えられる．以上のように，高所にカメラの位置決めを行うロボットには，開発の余地が残されているといえる．

そこで本研究では，高所にカメラの位置決めを行うロボット（以下，CastingBot と呼称する）を着想した．これはアンカーの取り付けられたテザーを複数投擲し，アンカーを森林内の樹木の枝などに引っ掛け，これらに懸垂しながらテザーを巻き取ることで移動する．さらに一度引っかかったアンカーを突起から分離させ，これらの手順を繰り返して高所に到達する．これにより高所へのカメラの設置を，迅速に行うことができると考えられる．

アンカーを着脱することにより移動する，本研究と似た動作原理の研究例として，SpiderBot[9] とスパイダーマンロボット [10] がある．これらは磁性体の天井のある屋内での利用を想定しているが，屋外での利用を想定した場合，樹木などの突起とアンカーの着脱や，長距離投擲などを考慮しなくてはならず，直ちに適用できるものではない．

これに対し CastingBot の移動機能の実現には，長距離投擲のために投擲時のテザーへの抵抗を低減すること，テザーのよじれを抑えること，アンカーを突起と着脱することが課題となる．本研究ではこれらの課題を解決するため，ウインチ機構，テザー収納容器，投擲機構，投擲姿勢制御機構，ウインチ保持機構，アンカーから成る CastingBot のコンセプトを立案した．本稿ではこのうち，ウインチ機構，テザー収納容器，アンカーの原理について述べ，試作・予備実験により実現可能性を検証する．

2.　コンセプト設計

本研究で立案した CastingBot の概観を Fig.1 に示し，高所にカメラを位置決めを行う手順を Fig.2 に示す．まず，(i) 地面に設置された CastingBot は，(ii) テザーを投擲し，(iii) 環境中の樹木の枝などの突起に引っ掛ける．これを (iv) 複数のテザーについて行い，(v) 懸垂しながらテザーを巻き取り移動する．その後，(vi) 突起に引っかかっているテザーの内 1 本を分離して巻き取り，(vii) 新たな目標位置に再度投擲する．(viii) これを繰り返すことで高所に到達し，(ix) そこにとどまってカメラの位置決めを行うこと

SY0009/21/0000 - 0607 © 2021 SICE

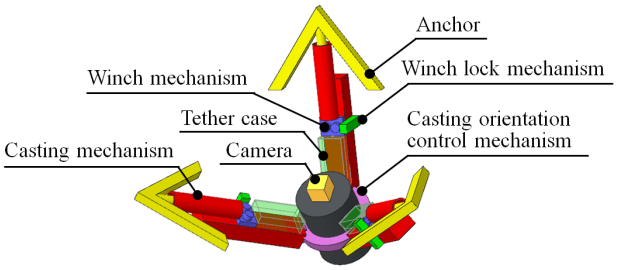

Fig. 1: Composition of the proposed CastingBot

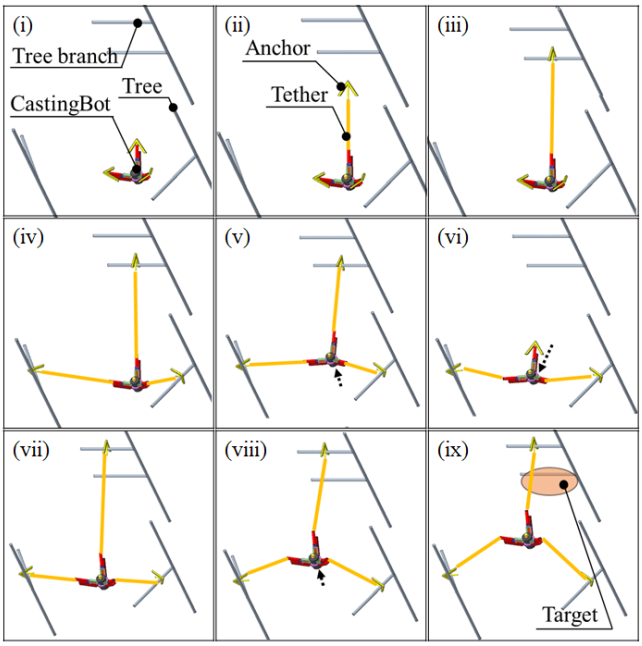

Fig. 2: Method of operation of CastingBot

ができる．

CastingBot が Fig.2(i)〜(ix) の動作を実現するためには，次の機能的要求が求められる．

機能 1 テザーを投擲する機能
機能 2 テザー長を制御する機能
機能 3 エネルギー消費なしに静止する機能
機能 4 投擲する方向を制御する機能
機能 5 アンカーと突起を着脱する機能
機能 6 動物がテザーを渡ること [11] を防ぐ機能

これらの機能的要求を満たすため，著者らは Fig.1 のように次の機構・構造から構成されるコンセプトを立案した．

A 投擲機構（機能 1）
テザー先端に取り付けられたアンカーに力を加えることでテザーを投擲する機構．

B ウインチ機構（機能 2）
2 つのスプールでテザーを挟み込んで駆動することでテザー長を制御する機構．

C テザー収納容器（機能 2）
ウインチ機構が巻き取ったテザーを，繰り出し時の抵抗が小さくなる形状で収納する容器．

D 投擲姿勢制御機構（機能 4）
投擲機構を動かして投擲する方向を制御する機構．

E ウインチ保持機構（機能 3）
ウインチ機構のスプールに差し込むことで回転を抑制する機構．

F アンカー（機能 5 ）
テザーの張力パターンにより，突起とアンカーの着脱を切り替える機構．

なお，テザーに比強度の高い高強度繊維ロープを用いて細径にすることで機能 6 を実現する．

3. 突起との着脱が可能なアンカー

3.1 張力の制御により着脱できる原理の提案

突起との着脱が可能なアンカーには次の機能が求められる．

a 長期間運用のために，アンカーにバッテリーの搭載が不要である機能
b 投擲時の反力を抑えるため，軽量である機能
c 多少の張力の変化があっても突起から分離しない機能

突起との着脱が可能なアンカーは様々な研究例があるが，大きく分けてアクチュエータを有するものとそうでないものに分類することができる．Robot ratcheted swivel[12]，TDH III[13]，TDH IV[14] などはアクチュエータを有しており，搭載されたアクチュエータにより変形することで突起から分離する．これらは短期間で着脱を数回のみ繰り返すことを想定しているため，内部にバッテリーを搭載しており，繰り返し・長期間に渡る利用ではバッテリー不足や通信の不安定性が懸念され a を満たさない．一方で TDH I[13] や TDH II[13] は受動的であるノックカム機構を搭載している．これらは内部にバッテリーを搭載しないが，テザーを常に強く張って利用することが前提とされており，テザーの張力が弱まるとアンカーと突起が分離するため，動作中にテザーの張力が弱まり得るロボットへの利用には適さず c を満たさない．したがって，a〜c を同時に実現する，突起との着脱が可能なアンカーには開発の余地が残されているといえる．

本研究では第一段階としてアンカーを引っ掛ける突起を円柱状で傾きのないものに限定し，アクチュエータを用いることなくテザーの張力の制御だけで突起と着脱できるアンカーを考案した．その概観を Fig.3 に，突起との着脱を切り替える動作原理を Fig.4 に示す．まず，CastingBot はテザーを投擲し，投擲されたテザーは突起に支持されて (i) のように垂れ下がる．その後，アンカーが静止するまで放置し，巻き取ることによりアンカーの状態は (ii) となり，さらに巻き取ることで (iii) または (iii') となる．アンカーの柄にあたる部分は上面が平坦であり，側面には尖った部分を持つ六角形の断面形状を有する．そのためアンカーが

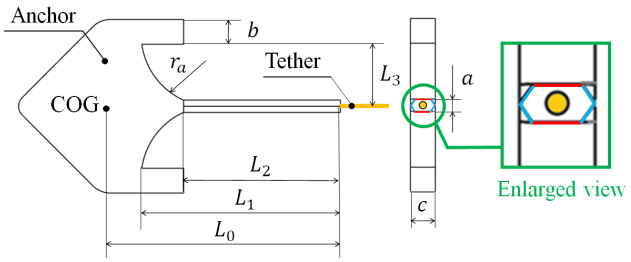

Fig. 3: Structure of anchor

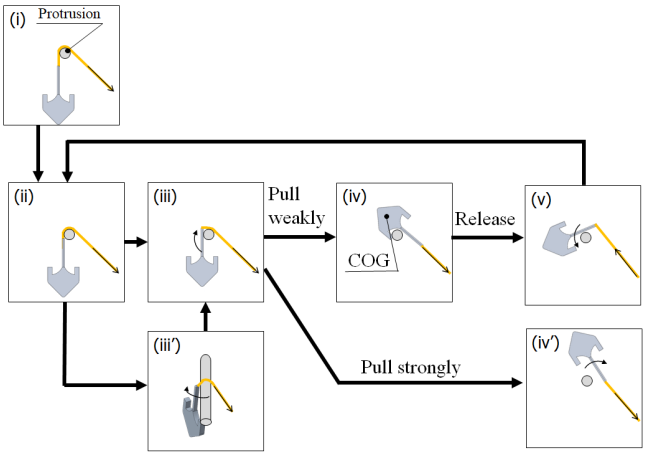

Fig. 4: Principle of anchor operation

一時的に (iii') に遷移してもテザー周りに回転し，(iii) で安定すると予想できる．(iii) から小さな張力でテザーを引くと，アンカーは (iv) に遷移してアンカーが突起に引っかかると考えられる．アンカーの重心位置とテザーの角度がある範囲内であれば，(iv) でテザーに与える張力を弱めると，アンカーは (v) を経由して (ii) に遷移することが予想できる．(iii) で大きな張力でテザーを引くと，小さな張力を与えた場合と比較して高い角速度で運動するため，アンカーは (iv') のように突起から離れて空中を移動し，分離すると考えられる．以上の動作原理によりテザーは突起との着脱を，与えた張力の大きさや方向，タイミングにより切り替えることができると考えられる．

3.2 アンカーの解析モデル

Fig.3 に示すようにアンカーの幾何学的パラメータを L_0，L_1，L_2，L_3，a，b，c，r_a，アンカーの質量を m，アンカーの重心における紙面方向周りの慣性モーメントを I とする．また，突起とアンカーに関する座標系・変数の定義を Fig.5(a) および (b) に示す．図中に示すように，突起の中心を原点として座標系 $O-xy$ を定義する．突起の半径を r，ウインチがテザーを巻き取る位置を O_1，アンカーの重心の座標を X_G，アンカーとテザーが結ばれている点を X_0，アンカーと突起の接触している点を X_2，アンカーの傾きを ϕ，点 X_0 におけるテザーの傾きを θ，点 X_0，X_2 が x 軸となす角度をそれぞれ ϕ_0，ϕ_2，テザーの張力を T，

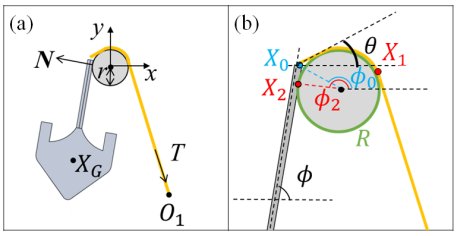

Fig. 5: Place of environment and anchor

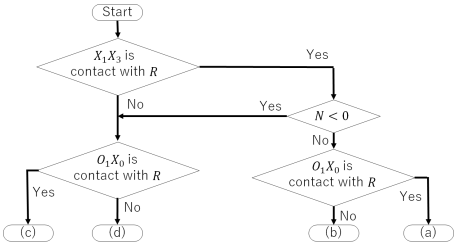

Fig. 6: Flowchart for switch anchor and tether cases

アンカーが突起から受ける垂直抗力を N とする．またテザーと突起の接触点で，O_1 までのテザーの輪郭線上の弧長が最小となる点を X_1 とする．

アンカーとテザーの位置関係が次の (a)-(d) のいずれであるかを求めるためのフローチャートを Fig.6 に示す．

(a) テザーとアンカーが突起に接触している
(b) アンカーのみが突起に接触している
(c) アンカーとテザーが突起に接触していない
(d) テザーのみが突起に接触している

アンカーの太さを十分細いものとして $a=0$ とみなすことで，フローチャートに示すとおり線分と円の接触判定を行う．(a)-(d) のそれぞれについて，アンカーがテザーから受ける力，突起から受ける垂直抗力，重力のみを考慮して動力学解析を行う．アンカーの運動方程式を導出し，それを変形すると次式が得られる．

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_G \\ \ddot{y}_G \end{bmatrix} = \frac{\mathrm{T}}{\mathrm{m}} \begin{bmatrix} \sin\theta \\ -\cos\theta \end{bmatrix} + \frac{N}{m} \begin{bmatrix} \cos\phi_2 \\ \sin\phi_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\mathrm{g} \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \frac{N}{I}(X_2 - X_G) \times \begin{bmatrix} \cos\phi_2 \\ \sin\phi_2 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{T}{I}(X_0 - X_G) \times \begin{bmatrix} \sin\theta \\ \cos\theta \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2}$$

また，幾何学的な関係から次式が成立する．

$$X_0 = X_G + L \begin{bmatrix} \cos\phi \\ \sin\phi \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\theta = \begin{cases} \phi_0 - \cos^{-1}\frac{r}{|X_0|} - \frac{\pi}{2} & ((\mathrm{a}),(\mathrm{d})\ \text{のとき}) \\ \tan^{-1}\frac{y_0}{x_0} & ((\mathrm{b}),(\mathrm{c})\ \text{のとき}) \end{cases} \tag{4}$$

なお，(b)，(c) のときアンカーが突起と接触していないため $N=0$ である．

これより，数値計算による動力学シミュレーションが可能である．

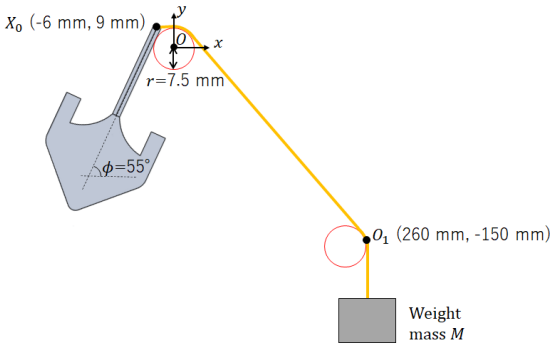

Fig. 7: Structure of experimental machine

Table 1: Parameters for anchor, projection, and cylinder

Variable	Value	Variable	Value
L_0	105 mm	b	12 mm
L_1	96 mm	c	12 mm
L_2	76 mm	m	25 g
L_3	30 mm	I	177 kg · mm^2
r_a	35 mm	O_1	(260 mm, −150 mm)
a	6 mm	r	7.5 mm

3.3 実験とシミュレーション

アンカーが機能的要求を満たすかどうか確認するため，アンカー，テザー，突起，おもり，円柱から構成される Fig.7 に示す実験装置を構成した．アンカーの初期条件は $\phi = 55$ deg と設定した．その他のパラメータを Table.1 に示す．静止したおもりを時間 t=0 s で自由落下させることでテザーに張力を与えたときのアンカーの軌跡を観察する実験を，おもりの質量 M を 403 g，515 g，608 g，647 g，694 g の 5 通りで各 10 回ずつ行った．

実験の結果，$M \leq 608$ g のとき，アンカーは突起と必ず引っかかり，$M \geq 647$ g のときアンカーは必ず突起から分離することがわかった．M= 608 g，647 g の結果を一例ずつ Fig.8(a)，Fig.8(b) に示す．

また，実験と同様の条件でシミュレーションを行った．M を 10 g ずつ変化させてシミュレーションを行った結果，$M \leq$160 g であるとき突起と引っかかり，$M \geq$170 g のとき分離するという結果が得られた．M = 160 g，170 g のときの結果を Fig.9(a) と Fig.9(b) に示す．

シミュレーションおよび実験の結果から，テザーの張力パターンを適切に与えることでアンカーと突起の着脱が可能であることが確かめられた．また，シミュレーションによって得られた結果は実験結果と定性的に類似した軌跡を描くことを確認した．一方，シミュレーションでは着脱が切り替わる重りの質量が 170 g であったが実験では 608-647 g と大幅に異なっていた．これは，アンカーおよびテザーが突起から受ける摩擦力を無視したこと，モデルでは常にテザーが張った状態を仮定したが実際にはアンカーが回転運動する際にたるみが発生し得ることが原因であると考えられる．

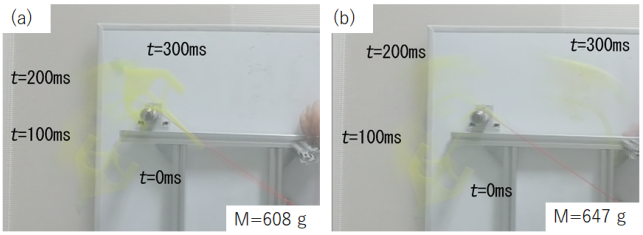

Fig. 8: Trajectory of the experimental result.

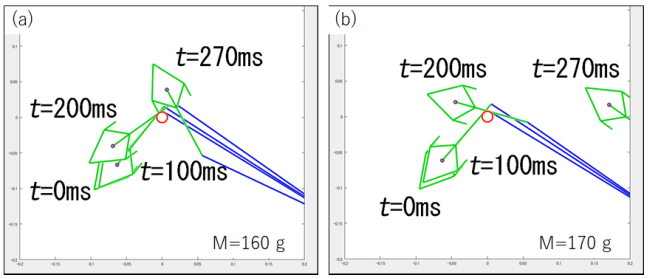

Fig. 9: Trajectory of the simulated result.

実験結果の再現性の検証，傾きのある突起に対する着脱性能の検証，摩擦を考慮した動力学解析は今後の課題である．

4. ウインチ機構

4.1 投擲による繰り出し時にテザーに抵抗を与えないウインチ機構の原理の提案

ウインチ機構に求められる機能は次の通りである．

a テザー長を制御する機能

b テザーがスプールの周りで絡まらない機能

c テザーの絡み防止のため，テザーがよじれにくい構造

d 投擲を妨げないように，投擲時に繰り出されるテザーに大きな抵抗を与えない機能

一般的なウインチを用いる場合，スプールの周速がテザーの繰り出し速度よりも早くなるとテザーが絡まる可能性があるため，b を実現するためにはスプールの周速がテザーの繰り出し速度と同じになるよう回転を抑制する必要があり，スプールの角速度をモータで制御する方法 [15] や自由回転するスプールにブレーキで抵抗を与える方法 [13] が利用される．これらはいずれも高出力なモータやブレーキが必要であるが，その質量やエネルギ，コストの観点から CastingBot に用いることは現実的でない．スプールに巻かれたテザーが自然と解けていく構造 [9] もあるが，これはスプールの軸方向からテザーを引き出すため，よじれが生じて c を満たさず，装置とテザーとの間で摺動抵抗が発生するため d も満たさない．これらのことから，a〜d を

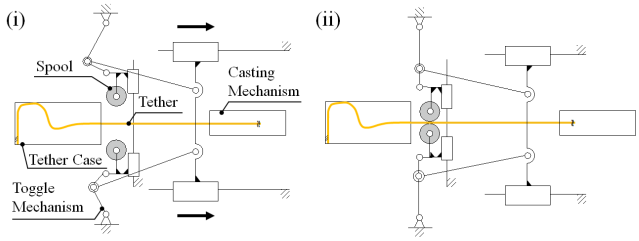

Fig. 10: Method of the mechanism winding tether

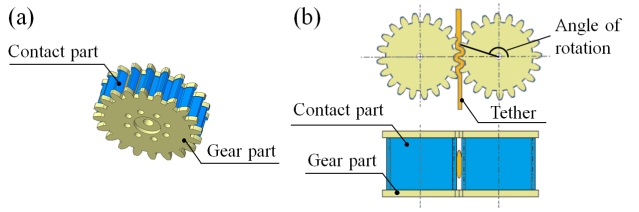

Fig. 11: (a) Structure of spool, (b) Two set of spool

同時に実現することのできるウインチ機構には開発の余地が残されているといえる．

本研究では，2 つのスプールでテザーを挟み込んで駆動することでテザー長を制御し，投擲時にはスプール同士の軸間距離を大きくすることでテザーとスプールを接触させないウインチ機構を提案する．このウインチ機構は Fig.10 に示すように主にスプールとトグル機構から構成される．スプールは Fig.11(a) に示すように，一対の歯車で構成される噛合部により接触部を挟んだ構造である．本研究では，表面の摩擦係数が小さい高強度繊維ロープを滑らないように保持するために，接触部にインボリュート歯車を利用することとした．ウインチ機構は次の手順で動作する．

(1) Fig.10(i) でトグル機構を駆動すると (ii) となり，テザーは Fig.11(b) のように 2 つの接触部に挟まれる．
(2) スプールの回転を操作すると，テザーと接触部との摩擦力によりテザーが駆動される．
(3) トグル機構を逆方向に駆動すると (i) に復帰する．このとき接触部はテザーと接触せず，投擲時にテザーに抵抗を与えない．

4.2 性能比較実験

スプールの接触部を歯車形状とした場合に摩擦力が増大するか検証するため，本研究で提案したスプール（以下，歯車スプールと呼称する）と，比較対象として円筒形状の接触部を持つスプール（以下，円筒スプールと呼称する）それぞれについて摩擦力を測定した．いずれのスプールも材質は PLA（ポリ乳酸）とした．円筒スプールはすきまが 0.13 mm となるよう直径を 39.87 mm，軸間距離を 40 mm とした．歯車スプールは軸間距離を 40 mm，接触部・噛合部の歯数を 20 とし，接触部はモジュール 1.93，噛合部はモジュール 2.0 とした．このとき噛合部におけるピッチ円直径は 3.86 mm であり，軸間距離と比較して 0.14 mm 小さい．円筒スプール，歯車スプール共に，外部からテザーを引っ張ることにより，目視により初めてすべりが確認できた張力を測定し，それを滑り始めた摩擦力であるとみなした．いずれもスプールが回転しないよう固定して摩擦力を測定し，歯車スプールについては回転角を変更して複数回実験を行った．

円筒スプールを用いたとき，すべりが発生した摩擦力は 24 N，歯車スプールを用いたとき，すべりが発生した摩擦力の最小値は 54 N であった．実験により，歯車スプールは円筒スプールよりも高い摩擦力でテザーを保持できたといえる．しかし長期間に渡る実験や軸間距離・モジュール・歯数などのパラメータを変化させたときの評価は十分行えていない．そのため今後は繰り返し荷重や表面に生じる傷によるスプールや高強度繊維ロープの劣化を検証するとともに，各パラメータを変えて詳細な評価を行う必要がある．

5. テザー収納容器

5.1 テザーを受動的かつ機械的に収納する原理の提案

一般的なウインチは，テザーをスプールに何周も巻きつけるが，前章で述べたウインチ機構ではテザーの端部をスプールに固定しない．これにより高速でテザーを引き出すことができるという効果を持つが，一方でテザーを収納するものが別に必要である．テザー収納容器には，ウインチ機構による押し込みのみで機械的かつ受動的にテザーが収納できること，投擲時の損失を低減するためにケーブル同士の摺動抵抗が小さいこと，投擲時に絡まらないようにテザーによじれが生じないことが必要である．

テザーが引き出された際によじれが生じないようにテザーを機械的かつ受動的に収納する手法の研究に，テーパー形ケース [16] がある．しかし，摩擦係数が小さく復元力も小さい高強度繊維ロープを利用する場合，僅かな誤差によりテーパー形状が容易に崩れてしまうため，所望の条件を満たさないことが考えられる．著者らは様々な寸法のテーパー形ケースを試作して試用してみたが，今回利用する直径 2 mm の高強度繊維ロープを収納して機能的要求を満たすことのできるテーパー形ケースは発見できなかった．

本研究では，座屈モードの逐次変化を利用することでテザーを Butterfly coil 状に収納するテザー収納容器を考案した．この形状はテザーをよじれることなく引き出せることで知られている [17] が，従来機械的かつ受動的にこれを実現する方法は知られていなかった．

今回試作したテザー収納容器は内部のサイズが幅 125 mm ×奥行 255 mm ×高さ 50 mm の直方体であり，底辺 12 mm，高さ 7 mm の三角形の開口部を設けてある．また端部にはテザーが固定されている．テザー収納容器の動作原理を Fig.12 に示す．テザー収納容器には (i) のようにウインチ機構からテザーが挿入され，座屈が発生する．座屈

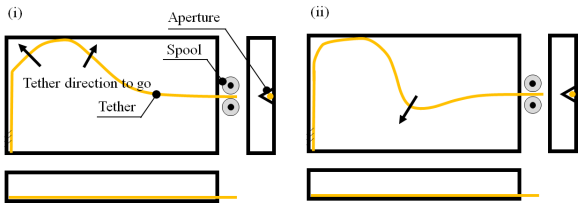

Fig. 12: Method of tether case

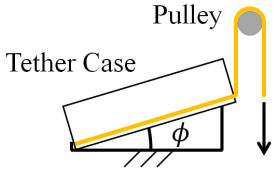

Fig. 13: Tether case for experiments.

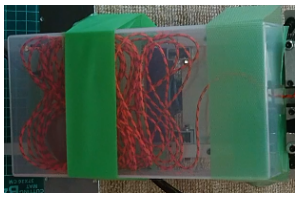

Fig. 14: Tether case storing the Butterfly coil

したテザーは壁面からの摩擦力や反力，テザー自体の復元力を受け 1 次座屈モードがある程度進展すると，(ii) のような 2 次座屈モードへと変化する．さらにテザーを挿入していくと座屈モードの次数が逐次変化していき，テザーは Butterfly coil 状に収納されると期待できる．

5.2 実験

テザー収納容器の収納性能を確認するため実験を行った．実験装置の構成を Fig.13 に示す．まず，水平面から ϕ だけ傾けられた，重さ 280 g のポリプロピレンのテザー収納容器の開口部に垂直となるよう，手動でテザーを 10 m 挿入する．その後滑車を用いて鉛直上向きにテザーに力を加えた．これを ϕ =45 deg，60 deg，80 deg，90 deg それぞれについて実験した．また，ϕ =45 deg については，テザーをウインチ機構により挿入する実験も行った．

実験の結果テザーをいずれの角度で挿入した場合にも，テザーは機械的かつ受動的に Butterfly coil 状に収納され，引き出す際にも絡まらなかった．テザーの引き出しに必要な力をばねばかりで測定した結果，最大値は 0.01 N 程度であった．テザーをウインチにより挿入した際も，テザーは Fig.14 に示すように Butterfly coil 状に収納された．

実験により，テザー収納容器はテザーを絡まることなく収納できたといえる．しかし，引き出しに必要な力を時間的に連続で測定できていないため，今後はより詳細な実験を行い，テザー収納容器のサイズや挿入する角度，材質などを変えて結果の再現性や収納性能を評価する．

6. 結言

本研究では，複数のテザーの投擲・巻取りとこれらへの懸垂により移動し高所にカメラの位置決めを行うロボットを提案し，そのための要素技術として環境に存在する突起に引っかかり着脱が可能なアンカー，投擲による繰り出し時にテザーに抵抗を与えないウインチ機構，機械的かつ受動的に Butterlfy coil 状にテザーを収納する容器について，それぞれ原理の考案と実現可能性の検証を行った．また，アンカーの動力学シミュレーションを行い実験結果と定性的に類似した軌跡を描くことを確認した．

今後は投擲機構・投擲姿勢制御機構・ウインチ保持機構の考案と各機能の詳細な評価を行い，これらを統合したロボット全体の開発に取り組んでゆく．

謝辞

本研究の一部は競輪の補助を受けて実施した

参考文献

[1] A. C. Burton, et. al.: “REVIEW: Wildlife camera trapping: a review and recommendations for linking surveys to ecological processes,” *J. Appl. Ecol., 52-3* (2015)
[2] 本郷他：“霊長類学におけるカメラトラップ研究”，霊長類研究，*34-1* (2018)
[3] T. Gregory, et al.: “Arboreal camera trapping: Taking a proven method to new heights,” *Methods in Ecology and Evolution, 5-5* (2014)
[4] M. T. Bowler, et al.: “Estimating mammalian species richness and occupancy in tropical forest canopies with arboreal camera traps,” *RSEC, 3-3* (2017)
[5] D. Engelbrecht: “Galagos as avian nest predators in South Africa,” *Primates , 57-4.* (2016)
[6] L. Tin, et al.: “Climbing strategy for a flexible tree climbing robot - Treebot,” *IEEE Trans. on Robotics, 27-6* (2011)
[7] G. Notomista, et al.: “The SlothBot: A Novel Design for a Wire-Traversing Robot,” *IEEE RAL, 4-2.* (2019)
[8] Georgia Tech: “Georgia Tech deploys SlothBot in Atlanta Botanical Garden,” URL https://www.youtube.com/watch?v=foiRTJnc-vA, （2021 年 10 月 11 日参照）.
[9] C. Alon, et al.: “SpiderBot: A cable suspended mobile robot,” *Proc. of ICRA* (2011)
[10] 壽田他：“ワイヤの射出・巻取・切断機能を有するスパイダーマンロボットの開発”，*ROBOMECH2021* (2021)
[11] SloCo: “Sloth Crossing canopy bridges” (2019), URL https://slothconservation.com/what-we-do/sloth-crossings/, （2021 年 10 月 11 日参照）.
[12] A. Winfield, et al.: “Internship report Design of a robot grapple” (2018)
[13] N. Asano, et al.: “Tethered Detachable Hook for the Spiderman Locomotion (Design of the Hook and its Launching Winch),” *STAR, Vol. 62* (2010)
[14] S. ROH, et al.: “Development of Tethered Detachable Hook IV for Robot Locomotion in Extremely Rough Environments,” *ROBOMECH2011* (2011)
[15] H. Arisumi , et al. : “Catching motion of casting manipulation,” *Proc. of IRS* (2000)
[16] ワタリ他 “空圧シリンダによりテザー付き子機を高く投擲する方法”，*J. JFPS, Vol. 43* (2012)
[17] PETZL: “How to coil the rope?,” URL https://www.petzl.com/US/EN/Sport/How-to-coil-the-rope-,（2021 年 10 月 11 日参照）.