受動クローラによる階段昇降機構の開発
(回転角度制限の解析と試作機の性能限界)平澤 順治^{*1}, 木村 哲也^{*2}Development of stair-climbing mechanism with passive crawlers
(Analysis of limitation for crawler rotation angle and test vehicle performance)Junji HIRASAWA^{*1} and Tetsuya KIMURA^{*2}^{*1} Department of Electronics and Control Engineering, Ibaraki College of Technology
866 Nakane, Hitachinaka-shi, Ibaraki 312-8508, Japan^{*2} Department of System Safety, Nagaoka University of Technology
1603-1 Kamitomioka-machi, Nagaoka-shi, Niigata 940-2188, Japan

Received 29 June 2015

Abstract

This paper describes a novel mechanism with passive crawlers that will realize a stair-climbing rescue robot with simple system. The proposed mechanism is called “SMART-III”, it is named after “Simple Mechanism Adaptive for Rough Terrain”. Some quasi-static dynamic analysis were implemented and effectiveness of limitation for crawler rotation angle were verified. A prototype robot with the SMART-III mechanism had been improved. Experimental results show the effectiveness and performance of the proposed mechanism against a step and continuous stairs.

Key words : Moving robot, Rescue robot, Passive crawler, Stair-climbing, Mechanism

1. はじめに

レスキューロボットや廃炉作業ロボットへの応用を目的とし、段差との接触により受動的に回転しうる形状のクローラユニット（以下、本稿では受動クローラと呼ぶ）を用いることで複雑な制御則を必要とせずに階段を昇降しうる移動機構を提案する。既報（平澤，木村，2014）では機構の静力学的な解析を行なうとともに、ロボット全高より高い段差への乗り上がり動作を実験により示したが、受動クローラの回転角度制限の効果に関する考察が不十分であった。今回、この効果について解析と実験を行ない、また連続する段差への対応について試作機の限界を明らかにしたので報告する。

東日本大震災により発生した原発事故の収束を目指し種々のロボットが投入されている（Greenemeier, 2011）。特に建屋内で作業するロボットには階段昇降と狹隘部での旋回の両立が求められており、ほとんどのロボットが本体部に対し能動的に回転できるサブクローラを備えた構造となっている（浅間他, 2014）。これらのロボットの活用実績はあるものの、廃炉作業は長期に渡り実施される見込であり、また福島以外の原発でも耐用年数が過ぎればその廃炉作業は避けて通れず、階段昇降という技術的課題に対してサブクローラとは別のアプローチからの解決法も提案し続けなければならない。特に廃炉作業では従事したロボットの放射化は避けられず、難易度の高い作業を遂行しうる複雑だが高性能なロボットと、限定された作業のみ遂行しうる単純な機能のロボットを併用することが必須であると考えられる。

一般にロボットの移動機構は車輪式・脚式・クローラ式とそれらのハイブリッド式に大別されるため、階

No.15-00357 [DOI:10.1299/transjsme.15-00357], J-STAGE Advance Publication date : 28 January, 2016

^{*1} 正員，茨城工業高等専門学校 電子制御工学科（〒312-8508 茨城県ひたちなか市中根 866）

^{*2} 正員，長岡技術科学大学 大学院技術経営研究科（〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1）

E-mail of corresponding author: hirasawa@ss.ibaraki-ct.ac.jp

段昇降可能なロボットも、車輪式（たとえばWooらのWMR（2007）やMoralesらの車椅子（2007）のように本体側の機構で車輪位置を変化させるものや、DalvandらのMSRox（2006）、吉田らの車輪径可変2輪ローバー（2006）や山本らの柔軟スポーク車輪（2011）のように車輪そのものに機能を持たせたものなど）、脚式（二足ではたとえば広瀬らの人間型ロボット（1997）や川副らの源兵衛（2007）、多脚ではたとえば小谷内らの6脚ロボット（1993）、小松らの4脚ロボット（2014）、笠井らの5脚ロボット（2014）など）、クローラ式（たとえば岩本らの形状可変クローラ（1988）、JeongらのVSTR（2008）、KimらのMACbot（2010）、三角クローラに特徴がある神村のロボット（2009）など）、及びこれらのハイブリッド方式（たとえば脚-車輪ハイブリッドではMabuchiら（1998）、Nakajimaら（2009）、岡田ら（2011）の研究など、クローラ-脚ハイブリッドではOttavianoらのTHROO（2014）など）の移動形態による種々のロボットが開発されている。しかしながら、これら既存のロボットの多くは、ロボット全体の重心を能動的に位置制御しなければならない必要性や、段差高さに応じたストローク量確保の必然性から、その全高は踏破すべき段差に比較して高くなる傾向にある。さらに重心移動・変形・脚振り上げ等の動作を実現するために、アクチュエータ数が増大する傾向にある。

著者はロボットの全高を抑えながら、より少ないアクチュエータで階段を昇降しうる機構について研究し、回転モータ1つのみで階段を昇降しうる機構を提案（平澤，2008）、試行錯誤を繰り返し実機による階段昇降動作の確認を行なった（平澤，2011）。ここでロボット全高は、倒壊した家屋内へ瓦礫隙き間から進入することを想定し、目安として階段高さ1段分より低くするコンセプトとした。機構をより単純にしながらも乗り越えるべき段差1段分の高さよりロボットの全高を低く抑えるという設計目標は達成できたが（平澤，2012）、試作機を用いた実験から実用化が困難な構造的特徴も明らかになった（平澤，2013）。

これら自他の研究を踏まえ、さらにシンプルかつ実現性の高い階段昇降機構を模索し、受動クローラを用いた新たな機構を着想するに至った（平澤，木村，2014）。本稿では以下、この機構をSMART-IIIと呼称する（“SMART”は Simple Mechanism Adaptive for Rough Terrain の頭文字）。

受動クローラによる階段昇降ではKangらのROBHAZ-DT3（Lee et al., 2005）が実用化されているが、このロボットは前後2ユニットの連結軸1本を受動回転軸としているのに対し、提案するSMART-IIIは本体部と4つのクローラ部の計5ユニットからなり、前後左右独立かつ同じ構造のクローラがそれぞれ独立した回転軸での受動回転を行なうことに特徴がある。また大金らのBLUE-R2（結城他，2010、また五十嵐他，

Fig.1 This figure shows outlines of robot with passive crawlers. ROBOHAZ-DT3 has 1 passive joint, and others have 4 passive crawlers. BLUE-R2 and Scott-I has symmetrical shape in forward-backward direction. Smart III has specialized shape in forward stair-climbing.

2011) や奥川らのScott I (松原他, 2015) など4つの受動クローラを持つロボットの先行事例もあり実験的に階段昇降が可能なが示されているが, これらが前後対称なクローラ形状を採るのに対し, SMART-IIIは昇降機能を重視し前進しながらの階段昇りに適した形状とした. また, 異なる半径のプーリーの組み合わせによるクローラ形状より, SMART-IIIの三角形形状のクローラの方が設計の自由度が高い. これらのクローラ形状ならびに受動回転軸の位置について模式的に示したものを図1にまとめる.

以下, 本稿第2章で提案する機構の力学的な解析について示す. 第3章で試作機について, 第4章で段差ならびに階段への適用実験について述べる. 第5章にまとめを記す.

2. 力学的解析

提案するSMART-IIIを装備したロボットの段差昇降の概要を図2に示す. 図2はロボットの左側面の模式図であり, 向かって左に段差を乗り越えながら前進する. ロボットはピッチ軸に平行な回転軸周りに受動的に回転する三角形のクローラ部と, これらを接続する本体部からなる. クローラ形状には, 希望する動作を受動的に実現することと同時に, 平地移動の際にはクローラに発生する駆動力をロボットの推進力として床面に伝えることが求められ, 試行的に三角形を採用した. 図1で比較したように, BLUE-R2やScott Iのよ

Fig.2 Stair-climbing sequence of SMART-III. (a)-(b)-(c)-(d)-(e)-(f)-(g)-(h)-(i) sequence shows motion without angle restriction. (a)-(b)-(c')-(d')-(e)-(f)-(g)-(h')-(i') sequence shows motion with angle restriction.

うに大小のプーリーを組み合わせたクローラに比べ、三角形状のクローラは小プーリーのみの組み合わせで製作でき、かつ形状の自由度が高いというメリットがある。クローラの動力はクローラ内部に搭載のモータで発生し、クローラ部と本体部の間にはトルクの伝達は一切発生しないような構造とする。

図2の(a)-(b)-(c)-(d)-(e)-(f)-(g)-(h)-(i)のシーケンスは当初想定していた階段昇降動作であるが、前報の実験結果から、前後クローラの回転角度の仰角側に上限を設けた方がより高い段差に対応しうる事が分かっている(平澤, 木村, 2014)。また、受動クローラにおいて回転角度の制限角を変更することによりロボットの段差乗り越え動作に影響することが実験的に知られている(木村他, 1998)。この回転角度制限を設けた場合は(a)-(b)-(c')-(d')-(e)-(f)-(g)-(h')-(i')のシーケンスとなる。すなわち、(c'), (d'), (h'), (j')において、クローラが階段に面ではなく点で接するようになると想定される。

このシーケンスに対し準静的な力学的解析を行ない一連の動作が可能であるかどうか考察を行なう。例えば図2の(a)で前クローラ部が段差垂直面に接すると、この接触点に発生する反力と、本体部を介して後クローラの駆動力で前方に押される力が図における時計回りのモーメントを発生し、(b)の状態に移行する。このように順次考えていくと、特に(c)~(d)の前クローラ持ち上げ動作、(h)~(i)に至る後クローラ部持ち上げ動作が力学的に実現可能か否かが問題となる。

解析のために図3の通り各部の寸法を規定する。試作機の状況から、クローラ回転軸の直下にクローラ部重心が位置するものとする。また、クローラのホイール径は全て等しいものとした。なお、図2, 図3においては本体重心位置とクローラ回転軸の高さが異なるものとして表しているが、後述する試作機においてはほぼ一直線状に置くことができたため、解析ではこの垂直方向の距離を無視する。

解析に用いる記号は以下の通り。

L : 前後クローラ受動回転軸 軸間距離

L_1 : ホイール中心~クローラ回転軸間水平距離

L_2 : クローラ回転軸~ホイール中心間水平距離

L_3 : クローラ回転軸~ホイール中心間垂直距離

L_4 : クローラ回転軸~クローラ重心間垂直距離

R : ホイール半径

M : 本体部質量

m : 前(後)クローラ部質量

R_{fx}, R_{rx} : 前後クローラ部回転軸水平反力

R_{fy}, R_{ry} : 前後クローラ部回転軸垂直反力

F_{fx}, F_{fy} : 前クローラ部で発生する摩擦力

F_{rx}, F_{ry} : 後クローラ部で発生する摩擦力

θ : 本体部傾斜角度 (シーケンス(x)における本体部傾斜角度を添字を用いて θ_x と表す)

δ_f, δ_r : 前後クローラ最大仰角

Fig.3 Dimensions of SMART-III

Fig.4 Equilibrium of forces : In sequence (c), the robot is assumed as 3 bodies. In sequence (c'), the robot is assumed as 2 bodies.

図4に基づき、図2のシーケンス(c)における力学的解析を行なう。シーケンス(c)は角度制限の無い場合に、前クローラ下端が地面に接している、すなわち前クローラが持ち上がる寸前の状態と規定する。まずは受動クローラの角度拘束が無い条件で解析を行ない、これを元に前クローラと本体を1剛体と見なしてシーケンス(c')における力学的解析とする。シーケンス(c')は角度制限のある場合に前クローラ仰角が上限に達し、かつ前クローラ下端が地面に接している、(c)と同様に前クローラが持ち上がる寸前の状態と規定する。シーケンス(c)における本体部傾斜角度を θ_c 、同様にシーケンス(c')における本体部傾斜角度を $\theta_{c'}$ とする。クローラ部との接続部は回転支点と見なし、本体部にはたらく重力、クローラ部回転軸から受ける反力の鉛直方向、水平方向それぞれの釣り合い式、また本体部重心回りのモーメントの釣り合い式は以下のように

$$R_{fy} + R_{ry} = Mg \quad (1)$$

$$R_{fx} = R_{rx} \quad (2)$$

$$R_{rx} L \sin \theta_c = (R_{ry} - R_{fy}) \frac{L}{2} \cos \theta_c \quad (3)$$

式(3)に式(1)を代入しまとめれば R_{fy} が消去できるので

$$R_{rx} \tan \theta_c = R_{ry} - \frac{Mg}{2} \quad (4)$$

次に後クローラ部の力の釣り合いを考える。摩擦はクーロン摩擦を仮定すれば、図4から

$$R_{rx} = F_{rx} \leq \mu(mg + R_{ry}) \quad (5)$$

最大の摩擦力が発生していると仮定すれば、すなわち式(5)の不等号を等号とし、式(4)と式(5)から R_{ry} を消去すれば

$$R_{rx} = \frac{\mu(2m+M)g}{2(1-\mu \tan \theta_c)} \quad (6)$$

式(2)の通り, この水平反力は本体部を介して前クローラ部にはたらく. 一方, 前クローラ部は垂直方向に重力, 受動回転軸からの反力, 垂直な壁との摩擦力を受ける. これらの釣り合い式は次の式(7)のように表すことができる.

$$mg + R_{fy} = F_{fy} \leq \mu R_{fx} \quad (7)$$

左辺に式(1)の R_{fy} を, さらに式(4)の R_{ry} を代入する. 右辺は式(2)を用いて R_{rx} で表せば

$$\frac{(2m+M)g}{2(\mu + \tan \theta_c)} \leq R_{rx} \quad (8)$$

式(6)と式(8)より

$$\mu^2 + 2\mu \tan \theta_c - 1 \geq 0 \quad (9)$$

式(9)はシーケンス(c)から(d)にいたるまでの前クローラ部持ち上げの条件が, ロボットの質量等に依存せず, クローラと段差表面との摩擦係数, ならびにロボット本体の姿勢にのみ依存することを意味している. また, 不等式を成立させるためには本体傾斜 θ_c が大きい方が有利である事を示している. 図2(c)~(d)において, 本体部傾斜角度 θ は徐々に大きくなるため, (c)における θ_c が条件式(9)を満たせばこのシーケンスは実現できる.

同様の解析を, クローラ部に回転角度制限を設けた場合について行なう. 図4のシーケンス(c)と(c')の比較から, 適切な角度制限を設ければ, (c')において後クローラの駆動力と前クローラが段差から受ける反力との偶力のモーメントの腕が長くなる. すなわち, この偶力のモーメントが大きくなり, より大きな荷重が後クローラに掛かり最大摩擦力の面で有利となると考えられる. 後述する実験結果から, ロボットがスタックするのは主にシーケンス(c')までであり, (c')をクリアできた場合は(i')もクリアできた. このため, 解析はシーケンス(c')について行なう. 図4に示す通り, 前クローラ部の仰角が最大角度 δ_f に達した状態を, 前クローラ部と本体部が一剛体になったとして扱う. この部分にはたらく垂直方向の力の釣り合いから,

$$F_{fy} + R_{ry} = Mg + mg \quad (10)$$

また, 水平方向の釣り合い式から, 回転角度制限無しの場合と同様に後クローラでは最大の摩擦力が発生するものと仮定すれば,

$$R_{fx} = R_{rx} = F_{rx} = \mu(mg + R_{ry}) \quad (11)$$

後クローラ回転軸まわりのモーメントの釣り合い式から

$$\begin{aligned} & F_{fy} \{ R + L_1 \cos(\delta_f + \theta_{c'}) + L_3 \sin(\delta_f + \theta_{c'}) + L \cos \theta_{c'} \} + R_{fx} \{ L_1 \sin(\delta_f + \theta_{c'}) - L_3 \cos(\delta_f + \theta_{c'}) + L \sin \theta_{c'} \} \\ & = mg \{ L_4 \sin(\delta_f + \theta_{c'}) + L \cos \theta_{c'} \} + Mg \frac{L}{2} \cos \theta_{c'} \end{aligned} \quad (12)$$

式 (10) から前クローラと壁の摩擦におけるクーロン摩擦力の式を立てれば

$$F_{fy} = Mg + mg - R_{ry} \leq \mu R_{rx} = \mu^2 (mg + R_{ry}) \quad (13)$$

$$R_{ry} \geq \frac{(1 - \mu^2)mg + Mg}{1 + \mu^2} \quad (14)$$

式 (12) に式 (11) , 式 (13) の関係を代入し R_{ry} と重力のみの関係式を求めれば,

$$\begin{aligned} & (mg + Mg - R_{ry}) \left\{ R + L_1 \cos(\delta_f + \theta_{c'}) + L_3 \sin(\delta_f + \theta_{c'}) + L \cos \theta_{c'} \right\} \\ & + \mu (mg + R_{ry}) \left\{ L_1 \sin(\delta_f + \theta_{c'}) - L_3 \cos(\delta_f + \theta_{c'}) + L \sin \theta_{c'} \right\} \\ & = mg \left\{ L_4 \sin(\delta_f + \theta_{c'}) + L \cos \theta_{c'} \right\} + Mg \frac{L}{2} \cos \theta_{c'} \end{aligned} \quad (15)$$

式 (15) を式 (14) の関係を用いて不等式としてまとめることで, 次の式を得ることができる.

$$\left\{ \begin{aligned} & 2\mu^2 R \\ & + 2(\mu^2 L_1 - \mu L_3) \cos(\delta_f + \theta_{c'}) \\ & + \{ 2\mu^2 L_3 + 2\mu L_1 - (1 + \mu^2) L_4 \} \sin(\delta_f + \theta_{c'}) \\ & + (\mu^2 - 1) L \cos \theta_{c'} \\ & + 2\mu L \sin \theta_{c'} \end{aligned} \right\} m + \left\{ \begin{aligned} & \mu^2 R \\ & + (\mu^2 L_1 - \mu L_3) \cos(\delta_f + \theta_{c'}) \\ & + (\mu L_1 + \mu^2 L_3) \sin(\delta_f + \theta_{c'}) \\ & + (\mu^2 - 1) (L/2) \cos \theta_{c'} \\ & + \mu L \sin \theta_{c'} \end{aligned} \right\} M \geq 0 \quad (16)$$

関係するパラメータが多いため式 (16) は式 (9) のように簡潔にまとめることができないが, 負の値を取る可能性のある項を考えれば, 前後クローラ回転軸間距離 L を短くする方が有利なことが分かる.

なお, 前報において既出の通り, 図 5 に基づいて回転角度制限の無い場合の後クローラ部持ち上げにおける解析を行えば, 以下のような式が導出できる (平澤, 木村, 2014). ここでシーケンス(i)は後フレームの受動回転軸が段差高さ面と同じ高さに達した状態と規定している.

$$\mu^2 + 2\mu \tan \theta_i - 1 \geq 0 \quad (17)$$

θ_i はシーケンス(i)における本体部傾斜角度であり, 式 (17) は式 (9) と全く同一の関係式である. 図 2 (h)~(i)において, θ は徐々に小さくなるため, (i)における θ_i が式 (17) を満たせばこのシーケンスは実現できる. 式 (9) における θ_c , 式 (17) における θ_i は, 図 4 もしくは図 5 に図 3 の寸法を当てはめて, 次のような幾何学的計算からそれぞれ求められる.

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{L_2 - L_3}{L} \right) \quad (18)$$

$$\theta_i = \sin^{-1} \left(\frac{L_3 + R}{L} \right) \quad (19)$$

Fig.5 Equilibrium of forces : In sequence (i), the robot is assumed as 3 bodies. In sequence (i'), the robot is assumed as 2 bodies.

よって θ_c と θ_i は段差高さに依存せず、また双方を大きくとるためには分母の L をなるべく短く、分子の L_2 をなるべく長くした上で L_3 は短く、ホイール半径 R を大きくするというを設計上の目安とすれば良い、式 (9) と式 (17) が同一の条件式であることから θ_c と θ_i が等しくなる条件により

$$L_2 = 2L_3 + R \quad (20)$$

ホイール半径 R は標準部品の使用など設計上の制約を受ける場合が考えられるので、前後クローラの干渉が無いような最長の L_2 を求め、式 (20) から L_3 を求める手順が提案できる。なお、この式は設計の目安を与えるものであり、後述の試作機では式 (20) の関係は完全には満たされていない。

式 (16) における θ_c は、図 4 における前クローラ受動回転軸の地面からの高さから、

$$L_3 \cos(\delta_f + \theta_c) + L_2 \sin(\delta_f + \theta_c) + R = L \sin \theta_c + L_3 + R \quad (21)$$

$$(L_3 \cos \delta_f + L_2 \sin \delta_f) \cos \theta_c - (L_3 \sin \delta_f - L_2 \cos \delta_f + L) \sin \theta_c = L_3 \quad (22)$$

$$\theta_c = \cos^{-1} \frac{L_3}{\sqrt{a^2 + b^2}} - \tan^{-1} \frac{b}{a} \quad (23)$$

ただし式 (23) 中の a , b は

$$\begin{cases} a = L_3 \cos \delta_f + L_2 \sin \delta_f \\ b = L_3 \sin \delta_f - L_2 \cos \delta_f + L \end{cases} \quad (24)$$

以上から、クローラ形状と段差の接触から本体部に傾きが生じ、この本体部の傾きにより前後いずれかのクローラ部により大きな荷重がかかり、摩擦力を稼ぐことで反対側のクローラ部を持ち上げ、段差を乗り越

Fig.6 Prototype of a SMART-III robot

Fig.7 Refine of a passive crawler unit

Table 1 Dimensions of the robot

M	0.21 [kg]	L_3	25 [mm]
m	0.22 [kg]	R	19 [mm]
L_1	21 [mm]	δ_r	55 [deg]
L_2	80 [mm]	μ	0.36 [-]

えるという、提案する機構の基本的な力学的関係、ならびに回転角度制限を設けた場合にも同様の効果が得られることを確認することができた。また、ロボットの設計に関するいくつかの定性的な知見を得ることが出来た。

3. 試 作

提案するSMART-IIIの動作確認のため実ロボットを試作した。図6に試作機の写真を示す。工作ならびに取付位置の調整等が容易であるため、(株)田宮模型から市販されている工作キットのパーツのみでロボットを構成した。多くは樹脂製パーツを使用しているが、解析において本体部とクローラ部は剛体と仮定しているので、回転軸には金属部品を使用するなど十分な強度の確保に留意し設計・製作した。前後のクローラには樹脂製トラックを、その駆動にはマブチモータ製FA-130モータをギア比203.7:1のギアボックスと組み合わせ使用した。各モータへの電力は、外部電源装置 (TEXIO PSF-400L) から有線で供給している。なお、前報 (平澤, 木村, 2014) の動作実験において、階段の角に接するクローラベルトが大きく変形してしまう事が視認ならびに映像から確認されていたため、図7のように小径のアイドラーホイールを複数配置する事で、このベルトの変形を可能な限り抑えた。

試作したロボットの各部の寸法等について表1にまとめる。クローラ部質量 m は前 (あるいは後) クローラ部左右2個分の値を示しており、本体部質量 M と合わせたロボットの総質量は0.65[kg]となる。クローラと段差表面の摩擦係数 μ に関しては、同じ材質のクローラを装着した物体を、実験で用いた模擬階段を作成したアルミ板に載せ、傾斜を増加し滑り出した角度を測定するという古典的な手法で計測した (滑り出しの

角度は 20° だった)。なお、クローラ回転軸間距離 L 、前クローラ最大仰角 δ_f は、次章で述べるように調整パラメータとして変化させながら実験を行ったため、この表に記載していない。図6の平地に設置した姿勢での、本体を含めた試作機全体の高さは96[mm]、全幅271[mm]、全長は軸間距離の調整に伴い変化するが、最大で427[mm]、最小で412[mm]であった。同じく図6の姿勢でのクローラ最高点高さ H_c は79[mm]であり、段差高さ H との比を $\zeta=H/H_c$ として定義する。1章で述べた、ロボットの全高が登るべき段差1段分の高さを越えないというコンセプトを、実験では $\zeta \geq 1$ を満たすものとして評価する（本体形状は設計に自由度があるが、クローラ最高点高さ H_c はクローラ形状に依存し確定するため）。

4. 実験と結果

4・1 段差乗り上がり実験 (EX.1)

まずは試作したロボットにより昇りうる段差の最大高さについて求めた。クローラ回転軸間距離 L を165[mm]で一定とし、段差高さ H はアルミ板を積み重ねることによって80[mm]から120[mm]まで、10[mm]単位で変化させた。あわせて回転角度制限の効果を確認するために、前クローラの最大仰角 δ_f を 40° 、 20° 、制限無しとの3通りで実験を行なった。

この実験の結果を表2に示す。表中の「◎」はその高さの段差への乗り上がりが可能であった事を示し、「(b)」や「(c)′」は図2のシーケンスの該当する姿勢でスタックしたことを示している。また、それぞれの回転角度制限の最大仰角に対して、力学的に昇降可能な条件式として求めた式(15)の左辺の値を計算した。実験による $\mu=0.36$ では $\delta_f=40^\circ$ の時も 20° の時も負の値となり条件が満たされなかった。試作機ではクローラ表面の凹凸から角に接する角度によってはわずかながらも引っかかりが生じ、高い摩擦係数と同等の効果が得られている可能性が観察される。よって解析の中の摩擦係数を高く仮定して再計算したところ、 $\mu=0.63$ で $\delta_f=40^\circ$ の時に正、 20° の時に負の値を取り、実験結果に近い条件となった。

結果から、回転角度制限を適切に設定する事で、より高い段差乗り越えに対応しうることが確認できた。ただし、制限角度の最適値を明らかにするには至らなかったため、今後より詳細な解析と、実験のための試作機の改良が必要である。

4・2 階段対応実験 (EX.2)

連続した段差、すなわち階段でも昇降が可能かどうかを確認するために、階段の踏み面長さ D を変化させ実験を行った。実験装置の概要を図8に示す。中間段の踏み面長さを変化させ、図のスタート位置から最上段まで到達することが出来れば成功とした。前節4・1の実験結果からクローラ回転の最大仰角は $\delta_f=40^\circ$ に設定、クローラ回転軸間距離 L は軸受取付位置を変化させることで、最小150[mm]から最大165[mm]まで5[mm]単位で4通りの変化をさせた。段差高さ H は1段目、2段目とも80[mm] ($\zeta=1.0$) で一定とした。

表3に、実験結果を示す。表中の記号は表2と同様である。軸間距離 L を短くすれば狭い踏み面長さ D にも対応しやすくなる傾向にあるが、今回は220[mm]が限度であった。階段の踏み面とロボットのクローラ回転軸間距離がほぼ等しくなるコンディションで前クローラ部が持ち上がり、昇りかける様子が観察された（表3の網掛け部）が、乗り越えには至らなかった。単に軸間距離を縮めるよりも効果的な性能向上につな

Table 2 Results of experiments (EX.1)

	step height H [mm]					equation (15)			
	80 ($\zeta=1.0$)	90 ($\zeta=1.1$)	100 ($\zeta=1.3$)	110 ($\zeta=1.4$)	120 ($\zeta=1.5$)	$\mu=0.36$	$\mu=0.54$	$\mu=0.63$	$\mu=0.72$
$\delta_f = 40^\circ$	◎	◎	◎	◎	(c′)	-27	-6.5	5.7	19
$\delta_f = 20^\circ$	◎	(b)	(b)	(b)	(b)	-35	-18	-7.1	4.9
No limit	(b)	(b)	(b)	(b)	(b)				

($L=165$ [mm])

Fig.8 Stair climbing experiment (EX.2)

Table 3 Results of experiments (EX.2)

		step depth D [mm]											equation (15)			
		140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	$\mu=0.36$	$\mu=0.54$	$\mu=0.63$	$\mu=0.72$
L [mm]	150	(a)	(b)	(b)	(b)	(a)	(a)	(a)	(a)	⊙	⊙	⊙	-22	-2.2	9.6	23
	155	(a)	(b)	(b)	(b)	(a)	(a)	(a)	(a)	⊙	⊙	⊙	-24	-3.6	8.3	22
	160	(a)	(b)	(b)	(b)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	⊙	⊙	-25	-5.1	7.0	20
	165	(a)	(a)	(a)	(b)	(b)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	⊙	-27	-6.5	5.7	19

($\delta_f = 40^\circ$, $H=80$ [mm], $\zeta=1.0$)

がる可能性があり、今後この条件を詳細に解析したい。

また、それぞれの軸間距離 L に対する条件式(15)左辺の値を計算した。式(15)の導出において踏み面長さは解析に含まれないため、踏み面長さの影響は確認できないが、軸間距離 L は短くなればなるほど値が大きく、すなわち乗り越えの条件を満たす傾向を示している。

4・3 階段最大高さ確認実験 (EX.3)

前節4・2、表3の実験結果から得られた $D=220$ [mm], $H=80$ [mm] ($\zeta=1.0$) という最も狭い踏み面

Fig.9 Stair-climbing motion of SMART-III. Step height $H=120$ [mm] ($\zeta=1.5$), Step Depth $D=220$ [mm], Length between passive rotation axis $L=150$ [mm], angle restriction $\delta_f=40$ [deg] (EX.3).

Table 4 Step size in Building Standard Act (Japanese)

H [mm]	D [mm]	inclination (Max)	purpose of the stairs
160 <	260 >	31.6°	Elementary school (A)
180 <	260 >	34.7°	Junior high school, etc. (B)
200 <	240 >	39.8°	Under ground, etc. (C)
220 <	210 >	46.4°	except (A), (B) and (C)
230 <	150 >	56.9°	Personal house

Table 5 Results of experiments (EX.4)

H [mm]	D [mm]	inclination	result
40 ($\zeta=0.51$)	58	34.7°	◎
45 ($\zeta=0.57$)	65		◎
50 ($\zeta=0.63$)	72		×

の条件で、ロボットの軸間距離は $L=150$ [mm]で固定し、段差高さを 5 [mm]ずつ増加させ乗り上がり動作を確認したところ、最高で $H=120$ [mm] ($\zeta=1.5$) の高さを乗り越えることができた。この時の動作を図9の連続写真に示す。踏み面が狭いためシーケンス(a)において、後クローラが昇り切らないうちに前クローラが段差垂直面に接しているが、この状態からでも次のシーケンスに移行しうる。また段差が高いためシーケンスの(d')から(h')までがほぼ同時に行なわれている。踏み面長ささと高さの比から斜度約 28.6° の階段に相当するが、建築基準法施行令(2013)から段差高さとの比率を考えれば、一般的な階段はより急峻となっている。表4に、建築基準法施行令に示された階段のけあげ寸法(段差高さ)ならびに踏面の寸法(踏み面長さ)をまとめる。

4・4 実階段対応のための予備実験 (EX.4)

ロボットの全高より高い段差を昇ることが開発当初のコンセプトであったが、前節4・3の実験結果から、実階段に対応させるためにはより急峻な階段に対応する必要があることが明らかになった。このため本節の実験ではロボットの全高に関するコンセプト、すなわち $\zeta \geq 1$ の条件には拘泥せずに、現時点での試作機の性能の限界を明らかにするために、試作機で昇りうる斜度 34.7° の階段高さを明らかにした。表4に示す通り、斜度 34.7° は中学校、高校の校舎、公共施設等の階段の建築基準上の最大斜度であり、これを目標とした。実験結果を表5に示す。段差高さ 45 [mm] ($\zeta=0.57$) までは連続する階段を昇ることができたが、段差高さ 50 [mm] ($\zeta=0.63$) では動作途中で後転してしまった。

結果から、試作機の性能限界を斜度 34.7° で段差高さ 45 [mm] ($\zeta=0.57$) とする。仮に同じ幾何学的関係を満足するロボットを製作し段差高さ 180 [mm]の実階段に対応させるには4倍のサイズが必要となり、体積比で 4^3 倍とし概算すれば、同じ材質で構成しても重量が 40 [kg]を越えてしまう。ロボット全高と段差高さの比については重要視せず、また4・2節で既述の、表3に示される狭い踏み面へ対応しうる可能性を追求し、より現実的な設計を行なう必要がある。また、仮にベルト幅をサイズに合わせて4倍とした場合、接地面積は 4^2 倍、重量は 4^3 倍となり、接地圧は4倍になり不整地移動に影響を及ぼす可能性がある。今後の実用化に向けた課題として、このスケールエフェクトの問題を踏まえた解析を行なうとともに、物理シミュレータの援用が求められる。

なお、4・1から4・4の全ての実験において、階段下りの動作は単に後進させれば実現できることを確認している。

5. おわりに

受動クローラを用いて階段昇降を可能とする機構を案出し、静力学的な解析と試作機による実験を行い、動作原理の確認と実機による動作の確認を行なうことができた。クローラの回転角度制限についても解析を行ないその効果の原理を確認し、また実験でもその効果を確認することができた。

提案する機構について、いくつかの設計要件を明らかにすることができた。また、試作機でパラメータを変化させながら実験を行い試作機の性能限界を明らかにすることができた。試作機で乗り越えができた階段の斜度は一般的な階段に達しておらず、さらなる解析を加えた上で、実階段に対応できるサイズの試作機の製作に着手したい。

文 献

- 浅間一, 三浦悟, 植木睦央, 露木陽, 浦環, ソーントン ブレア, 松日楽信人, 平井計仁, 野波健蔵, 真野敦史, Thomas BATTISTINI, Robert BIRMINGHAM, Christopher BROWN, Kim MONTI, Timothy TRAINER, 吉田智章, 川妻伸二, 津久井慎吾, 加瀬隆明, 森園竜太郎, 加藤晋, 江川栄治, 福島新一, 河村弘, 横井一仁, 福島原発事故対応および廃炉のためのロボット技術 (特集号), 日本機械学会誌, Vol.117, No.1151(2014), pp.647-691.
- Dalvand, M. M. and Moghadam, M. M., Stair climber smart mobile robot (MSRox), Autonomous Robots 20(2006), pp.3-14.
- Greenemeier, L., Robots arrive at Fukushima nuclear site with unclear mission, Scientific American(2011), available from <<http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=robots-arrive-fukushima-nuclear>>, (参照日 2015年6月20日) .
- 平澤順治, 木村哲也, 受動クローラによる階段昇降機構の開発, 第19回ロボティクスシンポジウム予稿集 (2014), pp.399-404.
- 平澤順治, 1つのモータで階段の昇降を実現する機構のトルク負荷と効率の検討, ROBOMECH 2013 in Tsukuba講演論文集(2013), 2A2-P13.
- 平澤順治, 1つのモータで段差の昇降を可能とする機構の改良と試作 レスキューロボットへの応用を目指して-, ROBOMECH 2012 in Hamamatsu講演論文集(2012), 2A1-N08.
- 平澤順治, 1つのモータで段差の昇降を可能とするロボットの試作と解析, ROBOMECH 2011 in Okayama講演論文集(2011), 2A2-L04.
- 平澤順治, 一つのモータで階段昇降を可能とするロボットの開発, 第13回ロボティクスシンポジウム予稿集 (2008), pp.218-223.
- 広瀬真人, 竹中透, 五味洋, 小澤信明, 人間型ロボット, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.7(1997), pp. 983-985.
- 五十嵐健生, 畠岡健太郎, 結城健太, 大金一二, 受動機構を用いたレスキューロボットのモビリティの向上について, ROBOMECH 2011 in Okayama講演論文集(2011), 1A2-I08.
- 岩本太郎, 山本広志, 天城滋, 地形適応機能を備えた実建屋内移動機構の開発, 日本ロボット学会誌, Vol. 6, No.1(1988), pp.67-74.
- 建築基準法施行令, 第二章 一般構造, 第三節 階段 (第二十三条-第二十七条), 最終改正 2013.7.12. available from <<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S25/S25SE338.html>>, (参照日 2015年6月24日) .
- Jeong, H. K., Choi, K. H., Kim, S. H. and Kwak, Y. K., Driving mode decision in the obstacle navigation of a variable single-tracked robot, Advanced Robotics No.22(2008), pp.1421-1438.
- 神村明哉, 高段差乗り越え可能なクローラロボット機構 (自動段差登り動作の実現), 日本機械学会論文集 C編, Vol.75, No.758(2009), pp.2742-2749.
- 笠井航, 加藤恵輔, 回り階段昇降が可能な生活支援ロボットの開発 — 4 + 1 脚型機構構成法の提案とその歩容の検討 —, ROBOMECH 2014 in Toyama講演論文集(2014), 1A1-P03.

- 川副嘉彦, 森山真太朗, 田口準, 古(いにしえ)の身体操法に学ぶ二足歩行ロボット「源兵衛」の自在な動きの発現(不安定を利用する階段の登り降り), 日本機械学会2007年度年次大会講演論文集(2007), pp.27-28.
- Kim, B. S., Vu, Q. H., Song, J. B. and Yim, C. H., Novel design of a small field robot with multi-active crawlers capable of autonomous stair climbing, *Journal of Mechanical Science and Technology* No.24(2010), pp.343-350.
- 木村哲也, 尾下順治, 高森年, 被救助者探索用瓦礫内移動システムの開発 — 視覚センサと障害物乗り越え移動の基礎的実験 —, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会講演予稿集(1998), 1CI4-2.
- 小松洋音, 尾形勝, 程島竜一, 遠藤玄, 福島E.文彦, 広瀬茂男, 4足歩行ロボットTITAN XIIの開発とその大型障害物踏破制御に関する基礎的研究, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.813(2014), DOI: 10.1299/transjsme.2014dr0128.
- 小谷内範穂, 安達弘典, 中村達也, 中野栄二, 階段昇降のための自立形6脚歩行ロボットの設計と制御, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.6(1993), pp.918-928.
- Lee, W., Kang, S., Kim, M. and Shin, K., Rough terrain negotiable mobile platform with passively adaptive double-tracks and its application to rescue missions and EOD missions, ICCAS2005, (2005).
- Mabuchi, T., Nagasawa, T., Awa, K., Shiraki, K. and Yamada, T., Development of a stair-climbing mobile robot with legs and wheels, *Artificial Life and Robotics* No.2(1998), pp.184-188.
- 松原秀彦, 鈴木壮一郎, 浅井友将, 奥川雅之, 栗栖正充, 衣笠哲也, 階段踏破時におけるマニピュレータ姿勢角を考慮した受動適応クローラロボットの重心位置変化, ROBOMECH 2015 in Kyoto講演論文集(2015), 1A1-U05.
- Morales, R., Gonzalez, A., Feliu, V. and Pintado, P., Environment adaptation of a new staircase-climbing wheelchair, *Autonomous Robot* 23(2007), pp.275-292.
- Nakajima, S. and Nakano, E., Adaptive gait for large rough terrain of a leg-wheel robot (Third report: step-down gait), *Journal of Robotics and Mechatronics* Vol.21 No.1, (2009), pp.12-19.
- 岡田徳次, ボテリョ田中ヴァーグナ, 清水年美, 動作自由度数を低減した脚車輪型移動ロボットの駆動機構と歩行および走行の双方向切り換え制御, 日本ロボット学会誌, Vol.29, No.3(2011), pp.306-316.
- Ottaviano, E., Rea, P. and Castelli, G., THROO: a tracked hybrid rover to overpass obstacles, *Advanced Robotics*, Vol.28, No.10(2014), pp.683-694.
- Woo, C., Choi, H. D., Yoon, S., Kim, S. H. and Kwak, Y. K., Optimal design of a new wheeled mobile robot based on a kinetic analysis of the stair climbing states, *Intelligent Robot System* 49(2007), pp.325-354.
- 山本元司, 高朋飛, 池田毅, 天井裏配線作業ロボットのための柔軟スポーク車輪の段差乗り越え性能, 日本機械学会論文集C編, Vol.77, No.778(2011), pp.2343-2350.
- 吉田和哉, 永谷圭司, 久瀬満広, 車輪径可変機構を有する小型2輪ローバーの開発, ROBOMECH講演論文集(2006), 2P2-D25.
- 結城健太, 五十嵐健生, 大金一二, レスキューロボットにおける受動機構の有効性について, 日本ロボット学会学術講演会予稿集(2010), RSJ2010AC3G1-4.

References

- Asama, H., Miura, S., Ueki, C., Tsuyuki, A., Ura, T., Thornton, B., Matsuhira, N., Hirai, K., Nonami, K., Mano, A., Battistine, T., Birmingham, R., Brown, C., Monti, K., Trainer, T., Yoshida, T., Kawatsuma, S., Tsukui, S., Kase, T., Morisono, R., Kato, S., Egawa, E., Fukushima, S., Kawamura, H. and Yokoi, K., Special issue on robot technology for accident response and

- decommissioning of the Fukushima daiichi nuclear power station, Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.117, No.1151(2014), pp.647-691(in Japanese).
- Dalvand, M. M. and Moghadam, M. M., Stair climber smart mobile robot (MSRox), Autonomous Robots 20(2006), pp.3-14.
- Greenemeier, L., Robots arrive at Fukushima nuclear site with unclear mission, Scientific American (2011), available from <<http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=robots-arrive-fukushima-nuclear>>, (accessed on 20 June, 2015).
- Hirasawa, J. and Kimura, T., Development of stair-climbing mechanism with passive crawlers, Proceedings of 19th Robotics symposia(2014), pp.399-404(in Japanese).
- Hirasawa, J., Investigation of torque and efficiency about a stair climbing mechanism that equips only one motor, Proceedings of the 2013 JSME conference on Robotics and mechatronics(2013), 2A2-P13(in Japanese).
- Hirasawa, J., Trial production of an improved stair climbing mechanism that equips only one motor - Aiming for an application for a rescue robot-, Proceedings of the 2012 JSME conference on Robotics and mechatronics(2012), 2A1-N08(in Japanese).
- Hirasawa, J., Trial production and analysis of a stair climbing robot that equips only one motor, Proceedings of the 2011 JSME conference on Robotics and mechatronics(2011), 2A2-L04(in Japanese).
- Hirasawa, J., Development of robot equipped with single motor for going up stairs, Proceedings of 13th Robotics symposia(2008), pp. 218-223(in Japanese).
- Hirose, M., Takenaka, T., Gomi, H. and Ozawa, N., Humanoid robot, Journal of the robotics society of Japan, Vol.15, No.7(1997), pp.983-985(in Japanese).
- Igarashi, T., Shimaoka, K., Yuuki, K. and Oogane, K., Mobility improvement of rescue robot with passive mechanism, Proceedings of the 2011 JSME conference on Robotics and mechatronics(2011), 1A2-I08(in Japanese).
- Iwamoto, T., Yamamoto, H. and Amagi, S., Development of terrain-adaptive mobile mechanism for actual indoor passage, Journal of the robotics society of Japan, Vol.6, No.1(1988), pp.67-74(in Japanese).
- Japan government, Enforcement order of building standards act, chapter 2, section 3 (stairs), available from <<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S25/S25SE338.html>>, (accessed on 24 June, 2015) (in Japanese).
- Jeong, H. K., Choi, K. H., Kim, S. H. and Kwak, Y. K., Driving mode decision in the obstacle navigation of a variable single-tracked robot, Advanced Robotics No.22(2008), pp.1421-1438.
- Kamimura, A., A crawler robot mechanism enabling high-step climbing (Realization of automatic climbing motion), Transactions of the Japan society of mechanical engineers, Series C, Vol.75, No.758(2009), pp.2742-2749(in Japanese).
- Kasai, W. and Kato, K., Development of life support robot moving on winding staircase -Proposal of 4+1 leg type mechanism and study its gait generation-, Proceedings of the 2014 JSME conference on Robotics and mechatronics(2014), 1A1-P03(in Japanese).
- Kawazoe, Y., Moriyama, S. and Taguchi, J., Emergence of JIZAI movement of humanoid biped robot based on the distributed control of physical body in a martial art (going up and down the stairs with instability), the Japan society of mechanical engineers annual meeting(2007), pp.27-28(in Japanese).
- Kim, B. S., Vu, Q. H., Song, J. B. and Yim, C. H., Novel design of a small field robot with multi-active crawlers capable of autonomous stair climbing, Journal of Mechanical Science and Technology No.24(2010), pp.343-350.

- Kimura, T., Oshita, J. and Takamori, T., Development of a rubble explorer system for rescue activities -Experimental evaluation of vision sensor and moving abilities-, Proceedings of the 1998 JSME conference on Robotics and mechatronics(1998), 1CI4-2(in Japanese).
- Komatsu, H., Ogata, M., Hodoshima, R., Endo, G., Fukushima, E. F. and Hirose, S., Development of quadruped walking robot TITAN XII and its basic consideration on the control of large obstacle traversing motion, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.80, No.813(2014), DOI: 10.1299/transjsme.2014dr0128.
- Koyachi, N., Adachi, H., Nakamura, T. and Nakano, E., Design and control of self-contained hexapod walking robot for stair-climbing, Journal of the robotics society of Japan, Vol.11, No. 6(1993), pp.918-928(in Japanese).
- Lee, W., Kang, S., Kim, M. and Shin, K., Rough terrain negotiable mobile platform with passively adaptive double-tracks and its application to rescue missions and EOD missions, ICCAS2005, (2005).
- Mabuchi, T., Nagasawa, T., Awa, K., Shiraki, K. and Yamada, T., Development of a stair-climbing mobile robot with legs and wheels, Artificial Life and Robotics No.2(1998), pp.184-188.
- Matsubara, H., Suzuki, S., Asai, T., Okugawa, M., Kurisu, M. and Kinugasa, T., Change in the center of gravity position for passive adaptive crawler robot considering attitude angle of manipulator at stair-climbing, Proceedings of the 2015 JSME conference on Robotics and mechatronics(2015), 1A1-U05(in Japanese).
- Morales, R., Gonzalez, A., Feliu, V. and Pintado, P., Environment adaptation of a new staircase-climbing wheelchair, Autonomous Robot 23(2007), pp.275-292.
- Nakajima, S. and Nakano, E., Adaptive gait for large rough terrain of a leg-wheel robot (Third report: step-down gait), Journal of Robotics and Mechatronics Vol.21 No.1, (2009), pp.12-19.
- Okada, T., Botelho, W. T. and Shimizu, T., Driving mechanism of a legged and wheeled mobile robot with minimal DOFs and control for reversible switching between walking and rolling, Journal of the robotics society of Japan, Vol.29, No.3(2011), pp.306-316(in Japanese).
- Ottaviano, E., Rea, P. and Castelli, G., THROO: a tracked hybrid rover to overpass obstacles, Advanced Robotics, Vol.28, No.10(2014), pp.683-694.
- Woo, C., Choi, H. D., Yoon, S., Kim, S. H. and Kwak, Y. K., Optimal design of a new wheeled mobile robot based on a kinetic analysis of the stair climbing states, Intelligent Robot System 49(2007), pp.325-354.
- Yamamoto, M., Gao, P. and Ikeda, T., Traverse ability of flexible spoke wheel for the wiring task mobile robot, Transactions of the Japan society of mechanical engineers, Series C, Vol.77, No. 778(2011), pp.2343-2350(in Japanese).
- Yoshida, K., Nagatani, K. and Kuze, M., Development of small-sized dual wheel rover with mechanism of variable wheel diameter, Proceedings of the 2006 JSME conference on Robotics and mechatronics(2006), 2P2-D25(in Japanese).
- Yuuki, K., Igarashi, T. and Oogane, K., Validity of passivity mechanism with rescue robot, Proceedings of annual conference of the Robotics Society of Japan(2010), RSJ2010AC3G1-4 (in Japanese).