

# 最下接地点モーメントがクローラロボットの 階段走行時の転倒に与える影響度の評価

○工藤 海 (東北大学), 遠藤 大輔 (東北大学), 永谷 圭司 (東北大学)

## A study on the effect of the Lowest Point Moment on Tracked Vehicles traversing stairs

○Kai KUDO (TOHOKU UNIVERSITY), Daisuke ENDO(TOHOKU UNIVERSITY),  
and Keiji NAGATANI(TOHOKU UNIVERSITY)

In this research, a physical-falling-model of tracked-vehicles during traversal on stairs is proposed. A feature of the model is to consider the Lowest Point Moment that is generated when grouser at the lowest point of the track touches to the stair. In this paper, we introduce the model and the evaluation result of our experiment with real tracked-vehicle on mock-stairs.

### 1. 緒言

クローラ型移動機構は、脚型と比較して駆動自由度が小さく、容易な構成で実現が可能である。また、車輪型と比較しても、不整地での安定性、走破性に優れている為、人間に代わって危険区域の探査活動を行うレスキューロボット等の移動機構として、広く採用されている。クローラ型移動機構を採用したロボット(以降、クローラロボット)の実用例として、東京電力(株) 福島第一原子力発電所の炉心溶融事故の建屋内探査を行った Quince[1]が挙げられる。このようなクローラロボットは、人間が立ち入れない危険区域の情報収集に貢献している一方、不整地を走行中に、転倒することによってスタック状態に陥り、走行および回収が不可能になるという問題が生じている。探査ミッションの成功率を向上させるためには、不整地へ進入する前に、その不整地における走破の可否を事前に判断することが望ましい。そこで筆者の所属する研究室では、このようなシステムの実現の第一段階として、クローラロボットの階段における走行安定性について、階段を転倒せずに走破するための物理的条件の考案とその妥当性を検証した[2]。これは、クローラロボットと階段の形状情報を用いることで、階段上の走破の可否を判断するもので、階段の角度が比較的小さい場合は、提案された物理モ

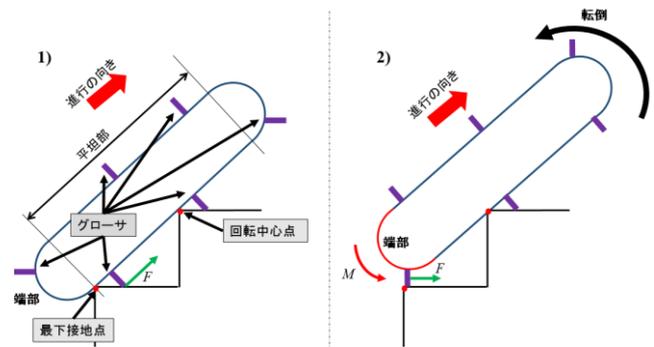


Fig.1 グロウサ形状を考慮した場合

デルで走破の可否が判断できることが、実機を用いた評価により示された。一方で、階段の傾斜角度が大きくなるにつれ、提案された物理モデルの転倒限界点よりも小さい角度で実機評価では転倒が生じるという問題があった。乖離の原因として、クローラの円弧軌道部(以降、端部)と、駆動力向上を目的としてクローラ表面に成形されている凹凸形状(以降、グロウサ)を、物理モデル上で考慮していないことを挙げた。ここで、Fig.1 はグロウサ形状を考慮した場合、クローラロボットが階段上を登坂する挙動を時系列順に示したものである。以下の1~2にそのプロセスを記す。

- 1) 最下接地点がクローラ平坦部にあるとき、クローラの進行方向のみに駆動力が生じ、モーメントの釣り合いを維持しながら、階段の傾斜角度に対し

平行に移動する。

2) 最下接地点が端部に存在するとき、グローサが端部に沿って動くことにより、駆動力は進行方向以外の成分を持つ。その結果、最下接地点では、ロボットが転倒する向きにモーメントを生じる。

以上のとおり、ロボットが最下接地点を離れる過程において、グローサと端部の作用により、ロボットが転倒する方向に回転モーメント(以降、最下接地点モーメント)が発生している。この為、グローサを考慮しないモデルに基づいて導出した転倒限界点より、実際には転倒に至り易いと考察した。

そこで本研究では、階段を走行するクローラロボットの転倒予測の精度向上を目的として、最下接地点モーメントを考慮した新たな物理モデルを提案し、その妥当性を検証する。

## 2. 最下接地点モーメントのモデル化

最下接地点モーメントが働いている場合に、階段を走行するクローラロボットがどの程度、転倒を生じやすくなるか物理的に導出する。Fig.2は、クローラロボットが最下接地点を離れる過程において、最下接地点モーメント $M$ が発生しているときの模式図である。このとき、クローラロボットが転倒しない為の物理的条件は、式(1)で記述される。

$$mgx\cos(\theta_s + \theta_x) - M \geq 0 \quad (1)$$

ここで、 $m$ はクローラロボットの質量、 $g$ は重力加速度、 $x$ は回転中心点と重心位置の距離、 $\theta_s$ は階段の傾斜角度、 $\theta_x$ は重心位置と回転中心点を結ぶ直線と、クローラロボットの平坦部が成す角度を示す。式(1)より、階段を走行するクローラロボットの転倒限界点 $\theta_{sc}$ は式(2)で表される。

$$\theta_{sc} = \arccos\left(\frac{M}{mgx}\right) - \theta_x \quad (2)$$

式(2)より、最下接地点モーメント $M$ が転倒限界点 $\theta_{sc}$ に及ぼす影響度 $\Delta\theta$ は式(3)で表される。

$$\Delta\theta = \theta_{sc}|_{M=0} - \theta_{sc}|_{M=M} = \arcsin\left(\frac{M}{mgx}\right) \quad (3)$$

式(3)より、最下接地点モーメントが転倒限界点に与える影響度 $\Delta\theta$ は $M/x$ の関数で表され一意に定まる。また、最下接地点モーメントが大きくなるにつれ、転倒限界点に与える影響度も増大することが分かる。

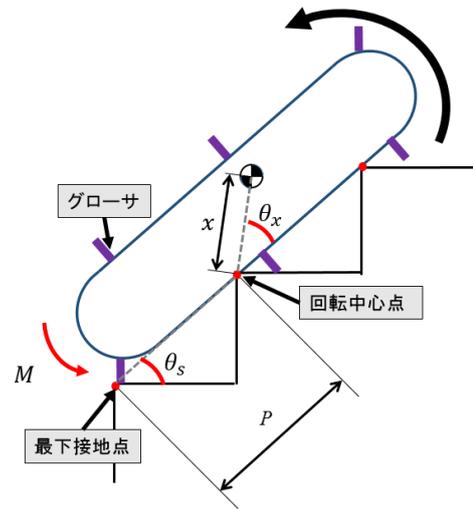


Fig.2 最下接地点モーメントを考慮した物理モデル

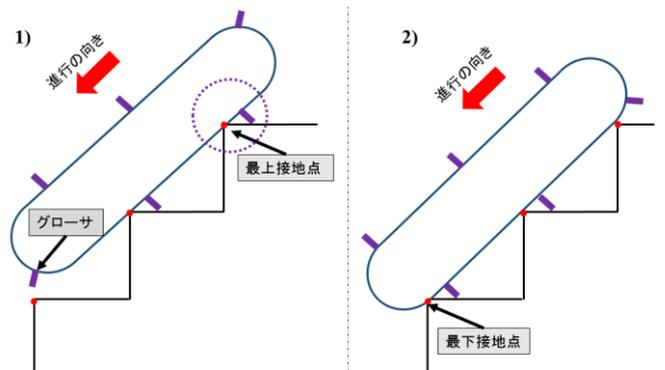


Fig.3 垂直降坂するロボットの挙動

## 3. 転倒限界点に与える影響度の評価

第2節では、最下接地点モーメントが転倒限界点に与える影響度について、物理的導出を行った。本節では、第2節で提案した物理モデルの妥当性の検証を行う為、最下接地点モーメントが転倒限界点に与える影響度 $\Delta\theta$ を評価により明らかにする。

### 3.1 $\Delta\theta$ の評価方法

最下接地点モーメントが転倒限界点に与える影響度 $\Delta\theta$ とは、即ち、最下接地点モーメントが発生する場合の転倒限界点と、発生しない場合の転倒限界点の差分である。クローラロボットが垂直登坂する場合、Fig.1で示したとおり、最下接地点モーメントが発生していることが分かる。このとき、ロボットの姿勢は最下接地点モーメントの作用により階段の傾斜角度を超え、上方の接地点(以降、最上接地点)を獲得できずに転倒を生じる。一方で、垂直降坂の場合、Fig.3のように、あらかじめ最上接地点でグローサが支えられている為、最上

接地点からグローサが完全に離れるまで、ロボットの姿勢は階段の傾斜角度に一致し、最下接地点に接触しない場合がある。このとき、ロボットに最下接地点モーメントは発生しない。

以上のことから、垂直降坂の場合、ロボットには最下接地点モーメントが働かない状況を作ることができ、このときの転倒限界点との差異が、最下接地点モーメントが転倒限界点に与える影響度 $\Delta\theta$ に相当すると考えられる。そこで、本研究では、垂直登坂時と垂直降坂時の転倒限界点の差異として $\Delta\theta$ を評価する実験を行う。以降、その内容と結果を示す。

### 3.2 試験装置

#### 3.2.1 クローラロボット

評価には、本研究室が有するクローラロボット Kenaf[3]を用いる。なお、Kenafは本来、前後左右に4箇所関節駆動部(サブクローラ)を有するロボットであるが、本試験では、サブクローラを取り外し、左右の対抗する2つのメインクローラのみを用いて試験を行う(Fig.4).

#### 3.2.2 階段試験装置

傾斜角度 $\theta_s$ およびピッチ $P$ が変化した場合の、転倒の発生の有無を評価するため、傾斜角度 $\theta_s$ およびピッチ $P$ を任意に変更可能な模擬階段装置(Fig.5~6)を用いる。本装置はアルミ板の平行板(踏板)の固定位置を調節することで、傾斜角度が $\sim 70[\text{deg}]$ 、ピッチが $\sim 2400[\text{mm}]$ の範囲で任意に調節が可能である。

### 3.3 試験方法

先述の階段模擬装置上に、クローラロボットを設置し、等速走行(速度 $v = 1.0[\text{cm/s}]$ 、加速度 $\alpha = 0[\text{cm/s}^2]$ )により垂直登坂および垂直降坂させ、クローラロボットの転倒の有無を観察する。階段模擬装置のピッチ $P$ は、15.0, 18.0, 20.0[cm]の3パターンを設定し、各条件において傾斜角度 $\theta_s$ を変化させ、繰り返し試験することで、転倒限界点を求める。なお、1つの条件に対し、繰り返し5回の評価を実施することとした。

### 3.4 試験結果

$P = 20.0[\text{cm}]$ 、 $\theta_s = 43.7[\text{deg}]$ の条件で垂直登坂および垂直降坂させた際のロボットの挙動を Fig.7 に示した。また、ピッチ $P = 15.0, 18.0, 20.0[\text{cm}]$ の試験結果をそれ



Fig. 4 クローラロボット Kenaf [3]



Fig. 5 模擬階段装置

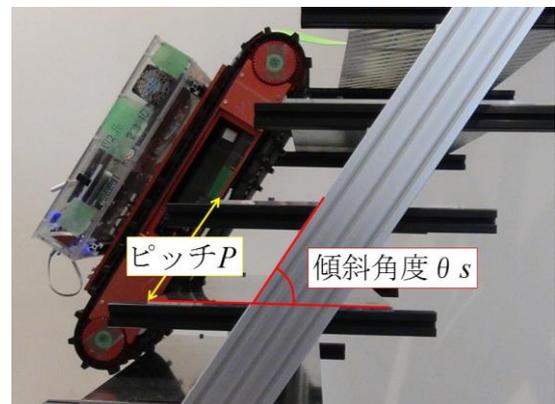


Fig. 6 ピッチ $P$ および傾斜角度 $\theta_s$

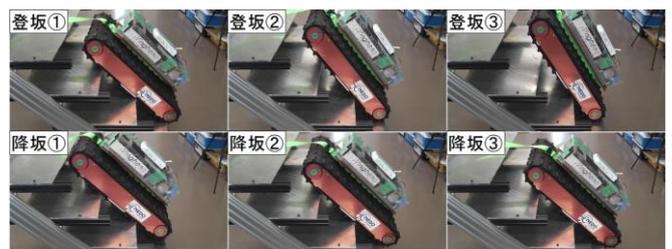


Fig.7 試験時の挙動( $P = 20.0[\text{cm}]$ ,  $\theta_s = 43.7[\text{deg}]$ )

ぞれ Fig.8~10 に示した. これらグラフにおいて, 各プロットは下記の結果を各々示す.

○ : 繰り返し 5 回全て, 転倒を生じなかった

× : 繰り返し 5 回全て, 転倒を生じた

△ : 転倒が生じた場合と生じない場合が混在した

なお, 転倒の定義は”最上接地点が瞬間的に離れた場合”とし, 目視により観察した. 次に, 垂直登坂と垂直降坂の転倒限界点の差異 $\Delta\theta$ とピッチ $P$ の関係を Fig.11 のように整理した. 本グラフにおいて, 転倒限界点の差異の最大値と最小値を誤差範囲で示している. ここで, 転倒限界点の差異の最大値 $\theta_{max}$ とは, 垂直登坂で一度も転倒を生じなかった最大の傾斜角度と, 垂直降坂で全て転倒を生じた最小の傾斜角度との差分とした. また, 転倒限界点の差異の最小値 $\theta_{min}$ とは, 垂直登坂で一度でも転倒を生じなかった最大の傾斜角度と, 垂直降坂で一度でも転倒が生じなかった最小の傾斜角度との差分とした.

### 3.5 考察

Fig.7 の条件では, 垂直登坂の場合は, 繰り返し 5 回の試験全てで転倒が生じたが, 垂直降坂の場合は図のように, 転倒を生じない場合があり, 差異が確認された. Fig.8~10 の結果より, 垂直登坂と垂直降坂とでは転倒限界点が異なり, いずれも, 垂直降坂時の方がより高い角度まで転倒しないことが分かる. これは垂直登坂の場合, Fig.1 に示すとおり, グローサと端部の作用により最下接地点モーメントが発生している一方, 垂直降坂の場合では, Fig.3 に示すとおり, 最下接地点モーメントが発生しないことにより生じた差異だと考えられる. これは第 3.1 節の考察と一致する結果であると言える. また, Fig.11 の結果より, ピッチ $P$ が増大するにつれ, 垂直登坂と垂直降坂の転倒限界点の差異 $\Delta\theta$ が減少する傾向が得られた. これは階段の形状( $P, \theta_s$ )に応じて, 最下接地点モーメントが変化することが原因の 1 つと考えられる.

以上より, 転倒の有無には最下接地点モーメントの影響があり, その大きさは階段の形状によって異なる結果を得た.

## 4. 最下接地点モーメントの評価

第 2 節で提案した物理モデルの検証には, 最下接地点

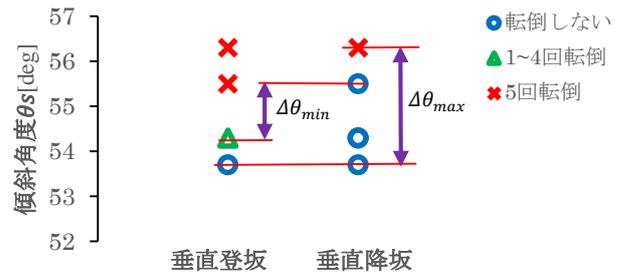


Fig.8 ピッチ $P = 15.0$ [cm]の結果

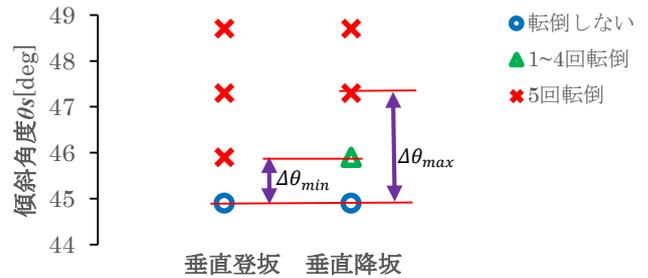


Fig.9 ピッチ $P = 18.0$ [cm]の結果

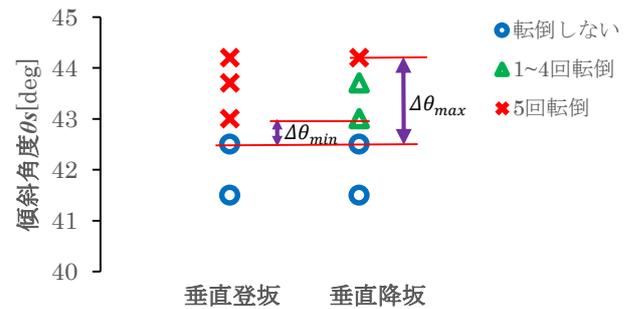


Fig.10 ピッチ $P = 20.0$ [cm]の結果

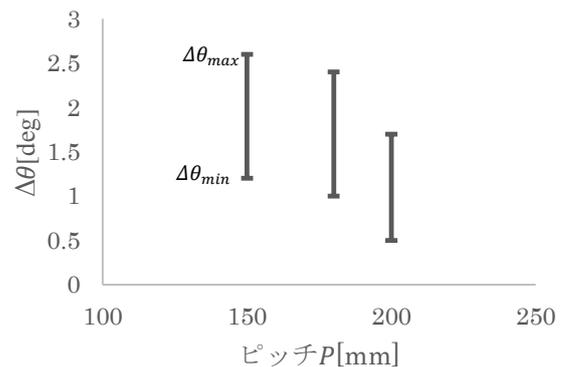


Fig.11 ピッチ $P$ および $\Delta\theta$ の関係

点モーメント $M$ の大きさを明らかにする必要がある. そこで, 本研究では, 最下接地点モーメントを実測する為, 評価装置開発し, その装置を用いて評価試験を行った. 以降, この装置を LMT(The Lowest Point Moment of the Track)測定装置と呼ぶ.

#### 4.1 LMT 測定装置

LMT 測定装置の概略図を Fig.12 に示す. LMT 測定装置では, 傾斜角度 $\theta_s$ を任意に設定可能な模擬階段を組み込み, 模擬クローラに加わる水平方向の力 $f_1$ および垂直方向の力 $f_2$ を滑車を介した重りにより調節することで, 階段の傾斜角度に応じた力の相互作用を再現する. また, 模擬クローラはリニアガイドにより, 上下左右の2方向に受動的な移動が可能である. 駆動力とモーメントを測定するため, 模擬クローラには静電容量型 6 軸力覚センサ(株式会社ワコーテック, DynPick WEF-6A500-10-RC5)を取り付け, 模擬クローラと模擬階段の相互作用を, 力/トルク情報として取得する. また, アクチュエータとして DC モータ(Maxon 社, RE40 150[W]), ギアヘッド(Maxon 社, GP42 減速比 91:1), エンコーダ(Maxon 社, エンコーダ MR Type L 1024 カウント/回転)を用いる.

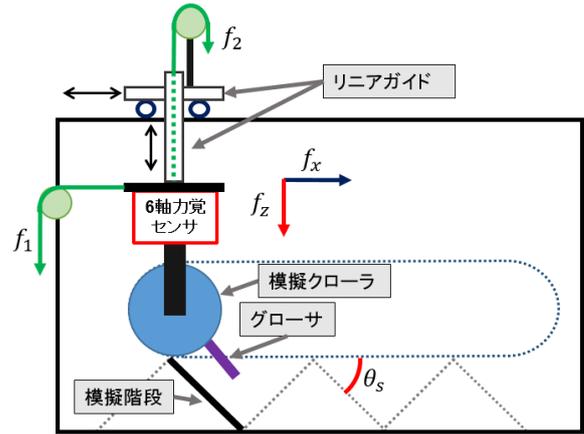


Fig.12 LMT 測定装置

#### 4.2 試験要領

第 4.1 節で述べた LMT 測定装置の模擬クローラに, 高さ 25[mm], 幅 10[mm], 長さ 125[mm]のゴム製のグローサを取り付け(Fig.13), モータを一定速度(2[rpm])で回転させ, 模擬クローラのグローサと模擬階段との相互作用の評価を行う. また,  $f_1 = 0[\text{kg}]$ および $f_2 = 6.2[\text{kg}]$ とし, 模擬クローラとグローサの荷重を模擬階段が負担しないようにすることで, 最下接地点の状態を再現する. 検証試験は模擬階段の傾斜角度 $\theta_s = 38.4, 50.0, 60.5[\text{deg}]$ の 3 条件についてそれぞれ計 10 回の試験を行う.

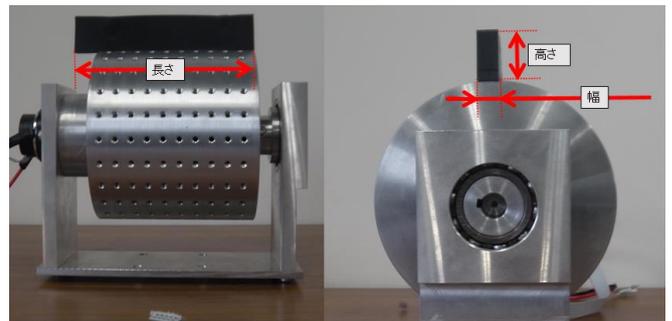


Fig.13 模擬クローラとグローサ

#### 4.3 試験結果

$\theta_s = 60.5[\text{deg}]$ の検証結果を Fig.14 に示す. ここで, 模擬クローラに加わる力 $F_x$ および $F_z$ は, Fig.12 に示す方向と対応し,  $F_x$ はロボットの進行方向に働く駆動力,  $F_z$ は進行方向と垂直方向に働く力である. また,  $t_0, t_e, t'_0, t'_e$ は次のように定義した.

- $t_0$  :  $F_x \geq 0.5$  を満たす最小の  $t$
- $t_e$  :  $F_x \geq 0.5$  を満たす最大の  $t$
- $t'_0$  :  $F_z \geq 0$  を満たす最小の  $t(t_0 \leq t'_0 \leq t_e)$
- $t'_e$  :  $F_z \geq 0$  を満たす最大の  $t(t'_0 \leq t'_e \leq t_e)$

#### 4.4 考察

Fig.14 より, 模擬クローラのグローサと模擬階段が接

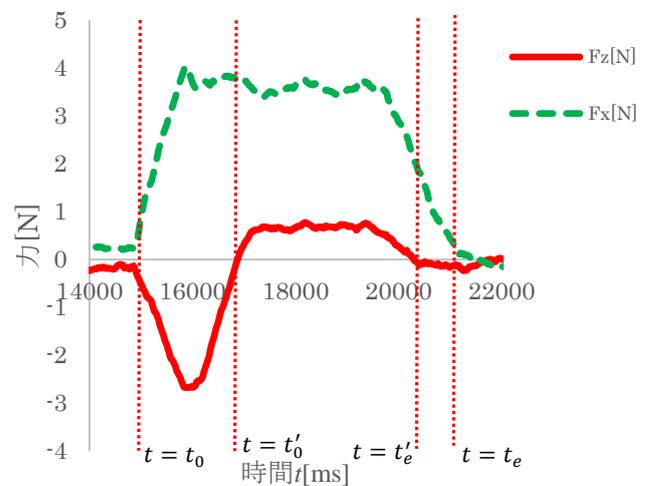


Fig.14  $F_z$ および $F_x(\theta_s = 60.5[\text{deg}])$

触している間は常に, 進行方向への駆動力 $F_x$ が発生した. また, 進行方向に対して垂直に働く力の成分 $F_z$ は, 接触直後では転倒を防ぐ方向に力が発生しているが, 接触から約 2 秒後,  $t'_0 \sim t'_e$ の区間では転倒する方向に力が発生している. このことから, 階段を走行するクローラロボットの最下接地点では, グローサと端部の作用により, 転倒する方向に最下接地点モーメントが発生していることが確認できた.

## 5. 物理モデルの妥当性の検証

本節では、これまでの評価結果をもとに、第2節で提案した物理モデルの検証を行う。(3)式は、最下接地点に働くモーメント $M$ が転倒限界点に与える影響度 $\Delta\theta$ を示している。ここで、最下接地点モーメントは第4節で明らかにしたが、どの瞬間のモーメントが転倒に寄与しているかは明らかになっていない。そこで、本研究では、転倒に寄与する最下接地点モーメントとして、以下の候補を挙げる。

$M_{max}$  :  $F_z \times P$ の最大値 ( $t_0' \leq t \leq t_e'$ )

$M_{ave}$  :  $F_z \times P$ の平均値 ( $t_0' \leq t \leq t_e'$ )

ここで、 $M_{max}$ は転倒する向きに働くモーメントの最大値を示し、 $M_{ave}$ は転倒する向きにモーメントが働いている時間 $t_0' \sim t_e'$ におけるモーメントの平均値を示している(Fig.16)。また $P$ は階段のピッチである。

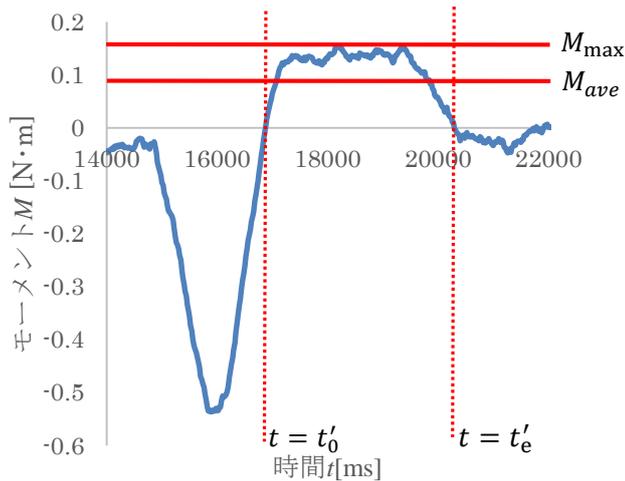


Fig.15 モーメント $M(\theta_s = 60.5[\text{deg}], P = 200[\text{mm}])$

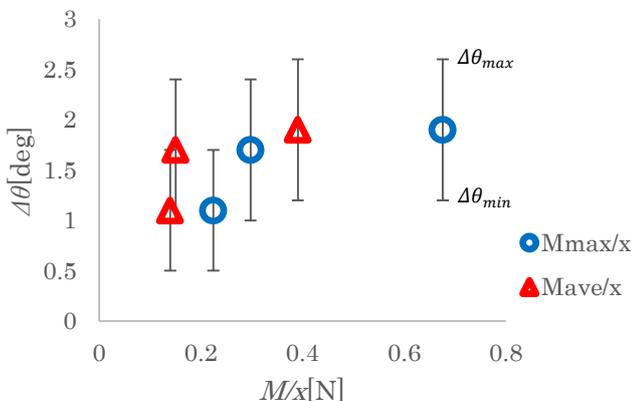


Fig.16 物理モデルの理論値と実測値

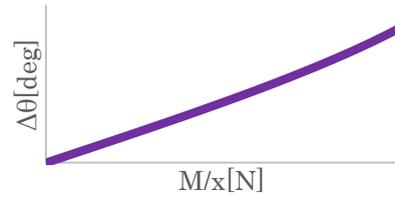


Fig.17 提案モデル

これまでの評価で得られた $M$ と $\Delta\theta$ について、 $(M/x, \Delta\theta)$ をプロットしたグラフをFig.16に示す。また、提案モデルをFig.17に示す。ここで提案モデルは式(3)を表す。

Fig.16より、実測値は右肩上がりの結果が得られた。しかし提案モデルはFig.17に示すように、下に凸となる曲線であるのに対し、実測値は上に凸となる傾向が得られた為、現時点では提案モデルの妥当性は十分とは言えない。しかしながら、 $M/x$ に対して $\Delta\theta$ は一意に定まることから、 $M/x$ の評価を行うことで $\Delta\theta$ を推定できる可能性がある。

## 6. 結言

本稿では、階段を走行するクローラロボットが転倒に至る要因の一つとして、最下接地点モーメントを取り上げ、転倒予測の精度向上を目的として、最下接地点モーメントを考慮した物理モデルを提案した。また、提案した物理モデルの妥当性を検証する為、実機を用いて最下接地点モーメントが転倒限界点に与える影響度を明らかにした。また、LMT測定装置で最下接地点モーメントの大きさを明らかにした。以上の評価をもとに、提案した物理モデルの妥当性を検証し、最下接地点モーメントと転倒しやすさとの相関を明らかにした。

今後は最下接地点モーメントの評価が転倒予測の精度向上に有用であるかどうかを検証する為の追試験を行い、転倒予測の物理モデルの修正を行う。

## 5. 参考文献

- [1] Keiji Nagatani et al, "Emergency Response to the Nuclear Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using Mobile Rescue Robots", Journal of Field Robotics Volume 30, Issue 1, pp.44-63 (2013)
- [2] 遠藤大輔, 永谷圭司, 吉田和哉, "クローラロボットの階段における走行安定性", 第32回日本ロボット学会学術講演会予稿集, RSJ2014AC3D2-03(2014-09)
- [3] 大野数則, 鈴木志穂子, 田所諭, 永谷圭司, 吉田智章, 小柳栄次, "Kenafの半自律操縦支援システムと3次元操縦インタフェースのDisasterCityでの実証実験", 第10回計測自動制御学会システムインテネレーション部門講演会論文集, 3M2-1 (2009-12)