

平面二足歩行モデルを用いたつまずき事象の確率モデリング

Stochastic Modeling of Accidental Trip Using Planar Bipedal Walking Model

○ 野土谷 亮 (京工繊大) 増田 新 (京工繊大) 坂田 義樹 (京工繊大)

Ryo NODOYA, Kyoto Institute Technology University
 Arata MASUDA, Kyoto Institute Technology University
 Yoshiki SAKATA, Kyoto Institute Technology University

Abstract: This paper proposes a stochastic model of an accidental trip during a stationary walking based on a planar bipedal walking model with knee to find a way to mitigate the risk of trip and fall of elder walkers. In this study, the accidental trip is defined as an unexpected contact of the swing foot with the ground that is modeled as a stochastic process. The motion of the foot is modeled by a set of deterministic equations of motion with a reduced set of the initial conditions at the instance just after the swing/support leg exchange. This model leads to a formulation of the probability of the accidental trip by introducing a hazard function, which is usually used in the reliability analysis. A case study using a simple walker model and a Gaussian white noise ground profile is numerically analyzed and the resulting stochastic map of the trip risk is presented.

Key Words: Trip, Walking Model, Stochastic Model, Hazard Function

1. 背景と目的

歩行時の転倒による怪我は高齢者が寝たきりになる主な原因の一つであり、近年の高齢化社会において問題視されている。加齢による転倒リスクの増加には身体能力の低下や認知能力の低下など様々な要因が複合的に影響していると考えられる。たとえば新井ら⁽¹⁾は、高齢者における転倒経験の有無と歩行周期の変動量との間に有意な相関が存在することを報告し、定常歩行時の歩行周期変動の増大は歩行能力の低下を総合的に表す指標であり高齢者の転倒リスクの評価に有用であるとしている。また、Lundin-Olssonら⁽²⁾による SWWT テストは二重課題に対する認知処理能力の低下を表す指標として支持されており、転倒経験との相関が報告されている。

転倒に至る機序は様々であるが、本研究では定常歩行時のつまずきに焦点を当て、つまずき生起確率を評価するための確率モデルを提案する。下肢を直線リンクで表現した確定的歩行モデルの解として足先軌道を表現し、地面高さを確率過程として表現することによって、直前の一步における下肢状態量の条件付き確率としてつまずき生起確率を表現する。

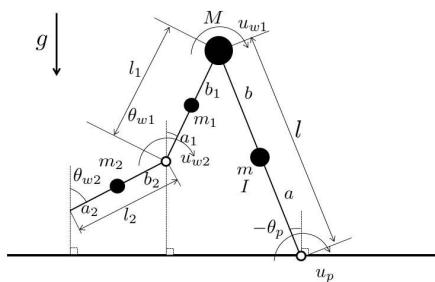


Fig.1 Planar bipedal walking model with knee.

2. 理論

2-1 歩行モデル

本研究で用いる歩行モデルは Fig.1 に示すような遊脚に膝関節を持つ3リンクからなる平面二足歩行モデル⁽³⁾とする。両脚の質量は胴体の質量 M と比べて十分小さいとし、 $\theta = [\theta_p \ \theta_{w1} \ \theta_{w2}]^T$ とすると運動方程式は次式となる。

$$M(\theta)\ddot{\theta} + H(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta, \gamma) = U \tag{1}$$

ここで右辺は関節トルク項である。遊脚の膝関節は伸びるとロックされ、その後は2リンクとなって運動をする。ロック後の運動方程式を次に示す。

$$M_c(\theta_c)\ddot{\theta}_c + H_c(\theta_c, \dot{\theta}_c) + G_c(\theta_c, \gamma_c) = U_c \tag{2}$$

モデルにおいて状態変数は関節角であり、関節角度と関節角速度を初期条件として式(1)と式(2)を解くことで各リンクの運動を求めることができる。支持脚と遊脚の切替は瞬時に完全非弾性に行われるとすると、角運動量保存則より切替の前後において次式が成立する。

$$Q^+(\theta)\dot{\theta}^+ = Q^-(\theta_c)\dot{\theta}_c^- \tag{3}$$

式(3)右辺の行列において遊脚角速度にかかる係数はゼロであり、すなわちこの歩行モデルの初期条件は切替直後の支持脚角度および支持脚角速度に縮約される。

2-2 つまずきの確率モデル

本研究では、遊脚足先が正の速度をもってスイングしている途中における地面との意図しない接触をつまずきと定義し、直前の一步における切替直後の支持脚角度および支持脚角速度が与えられたときのつまずき事象の条件付き生起確率を表すモデルを構築する。次の仮定を設ける。

1. 地面の高さはマルコフ過程と仮定する。本研究では平均値 L、標準偏差 σ の正規分布に従う定常白色過程とする。
2. 歩行中の関節トルクは確定的に与えられるとする。
3. 遊脚足先軌道 (Fig.2 に例を示す) の二つの極大点 (○印) の間における地面との交差をつまずきと定義する。

支持脚接地位置を原点とし進行方向を正とする水平軸を x として y(x) を遊脚足先軌道、g(x) を地面の高さとする。軌道 y(x) の二つの極大点を x₁, x₂ とする。

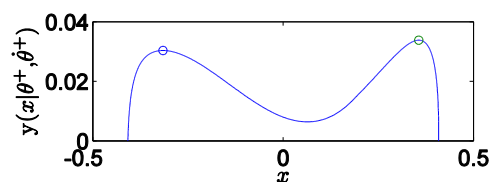


Fig.2 The orbit of toe swing leg

上述のように、 $x_1 \leq x \leq x_2$ において、 $y(x) < g(x)$ となることをもってつまずきと判断する。つまずき位置をあらわす確

率変数を X として、この事象のハザード関数 $h(x)$ 、すなわち位置 x までつまずいていない条件下で次の瞬間につまずく確率密度関数は次式ようになる。

$$h(x|\theta^+, \dot{\theta}^+) = \frac{1}{2} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{y(x|\theta^+, \dot{\theta}^+) - 1}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right) \quad (4)$$

ここで erf は誤差関数である。Fig.2 の足先軌道に対するハザード関数の形を Fig.3 に示す。つまずき位置の確率分布関数を $F(x)$ とすると、 $F(x_1) = h(x_1)$ を考慮して、

$$F(x|\theta^+, \dot{\theta}^+) = 1 - \exp \left(\int_{x_1}^x h(u|\theta^+, \dot{\theta}^+) du + \ln(1 - h(x_1)) \right) \quad (5)$$

となる。よってつまずき生起確率は

$$P_{trip}(\theta^+, \dot{\theta}^+) = F(x_2|\theta^+, \dot{\theta}^+) \quad (6)$$

となる。

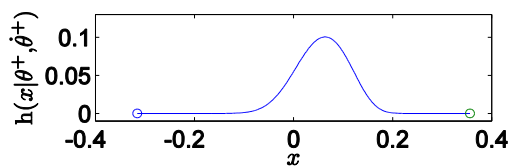


Fig.3 Hazard function of accidental trip.

3. ケーススタディ

Fig. 1 の歩行モデルにおける寸法パラメータを $l_1/l_2=l_3/l_4=l_5/l_6=l_7/l_8=0.5$, $a_1/l_1=a_2/l_2=b_1/l_3=b_2/l_4=0.25$, 大腿部に対する下腿の質量比を 0.4 としてケーススタディを行った。各関節に対するトルク入力パターンは人間の歩行時における筋トルクを参考にして設定すべきところであるが、本研究では簡単のため角度 0.01 rad の斜面上に置いた受動歩行機械が受ける重力トルクを模擬した一定トルクを与えた。ただし遊脚下腿リンクには脚の振り抜き時に膝がより顕著に曲がるようにトルクの符号を逆転した。

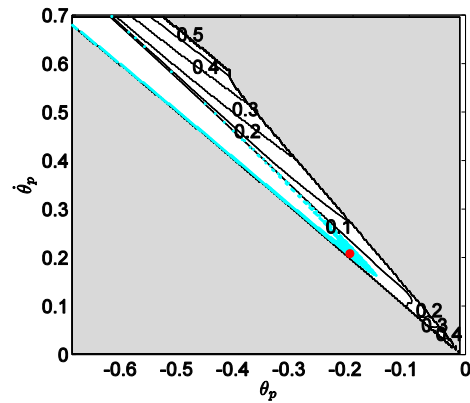
このモデルに対して三種類の路面状態について様々な初期条件(切替直後の支持脚角度および支持脚角速度)を与えたときのつまずき確率を計算したものを Fig. 4 に示す。図中に等高線がつまずき確率、赤丸は安定な周期歩行解、水色の領域は周期歩行解の吸引領域である。なお、初期条件によっては前方転倒や後方転倒、遊脚の振りの往復運動が生じて次の一步を踏むことができない。そのような初期値の領域は薄いグレーで示し、議論の対象から除外する。

4. 考察

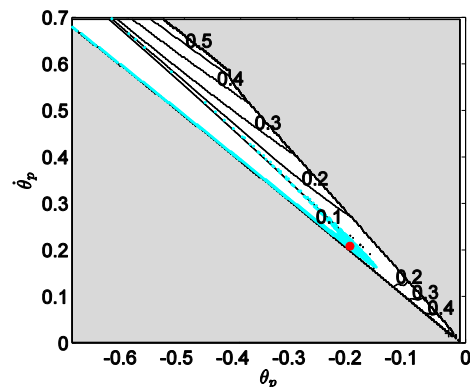
今回提案した確率モデルは直前の一步の切替直後の状態量に対する条件付きつまずき確率を与えるものである。実際の歩行におけるこの状態量は、筋トルク制御における様々な外乱要因から、たとえ定常歩行時であっても周期歩行解の周辺でばらついていると考えられる。すなわち状態量は確率変数と考えられる。よってその確率密度関数を $p(\theta^+, \dot{\theta}^+)$ とすると、つまずき確率は次式で与えられる。

$$P_{trip} = \iint_{(\theta^+, \dot{\theta}^+) \in \Theta} P_{trip}(\theta^+, \dot{\theta}^+) p(\theta^+, \dot{\theta}^+) d\theta^+ d\dot{\theta}^+ \quad (7)$$

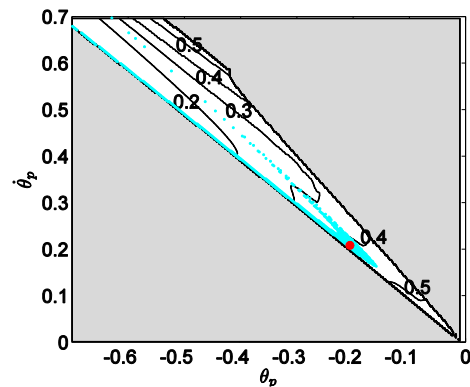
状態量のばらつきは身体的・環境的要因の影響を受け、加齢が支配的な因子の一つであることは想像に難くない。たとえば高齢者に見られる歩行周期の変動も状態量のばらつきに還元されると考えられる。したがって加齢因子を状態量のばらつきに適切に反映させることにより、加齢によるつまずきリスクの増加を評価できると予想される。



(a) $L=0, \sigma=0.005$



(b) $L=0, \sigma=0.01$



(c) $L=0, \sigma=0.05$

Fig.4 The result of simulation with stochastic model of trip.

5. まとめ

本報告では、歩行モデルにおける転倒を引き起こす原因となるつまずきの確率モデルを提案した。ケーススタディを示すとともに、提案した確率モデルへの加齢因子の組み込みについて道筋を示した。

参考文献

- (1) 新井智之, 柴善崇, 渡辺修一郎, 柴田博, 10m歩行における歩行周期変動と運動機能, 転倒との関連, 理学療法学, Vol. 38, No. 3, pp. 165-172, 2011.
- (2) L. Lundin-Olsson et al., "Stops walking when talking" as a predictor of falls in elderly people, Lancet, Vol. 349, No. 9052, pp. 617-619, 1997.
- (3) 池俣吉人, 佐野明人, 藤本英雄, 受動歩行の安定メカニズムを規範とした平衡点生成と局所安定化, 日本ロボット学会誌, Vol. 24, No.5, pp. 612-639, 2006.