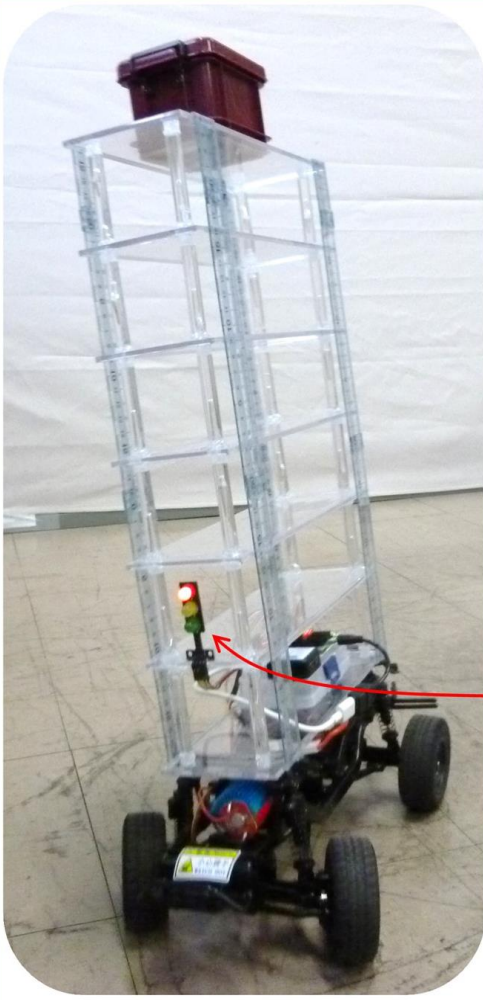


# 三次元重心検知理論に基づく横転防止最速自動コーナリング

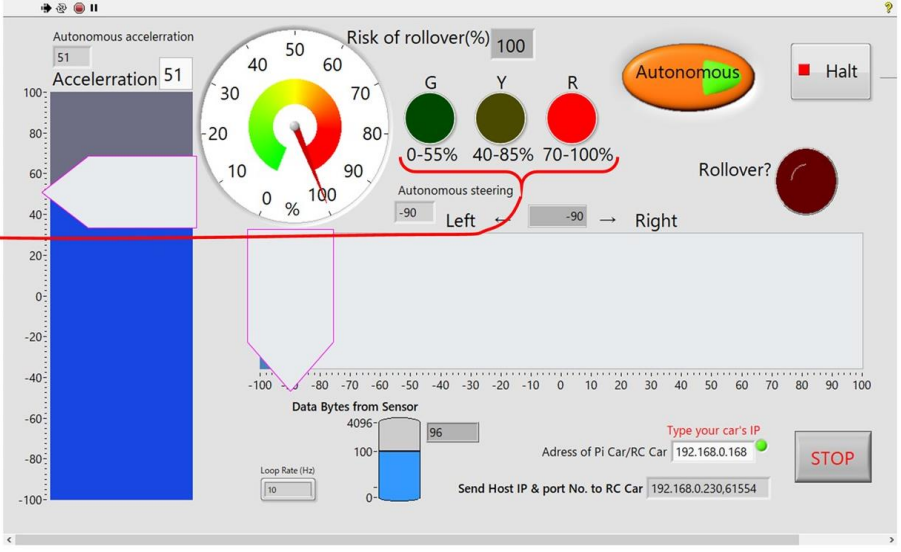
## Fastest autonomous cornering without causing rollover based on the Detection of Three-Dimensional Center of Gravity (D3DCG)

東京海洋大学 三次元重心検知理論研究室 Team D3DCG



### D3DCG自動最速コーナリング実験仕様

- 車両: 1/10 スケールWi-Fi コントロール車 (四駆)
- マイコン: ラズベリーパイ
- モーションセンサー: ウィットモーションBWT901
- OS: ラズベリーパイ OS
- 重心位置の変位方法:  
積層荷台の任意の位置への錘の積載
- アクセルコントロール: 比例-微分 制御



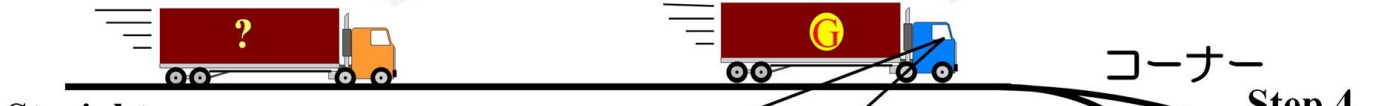
Step 1

三次元重心検知理論発動!

Step 2

$q_{max}$  を検知!

Enjoy D3DCG here!  
Welcome!!



Step 3

次のコーナーで 35 km/h に自動減速します。



了解!

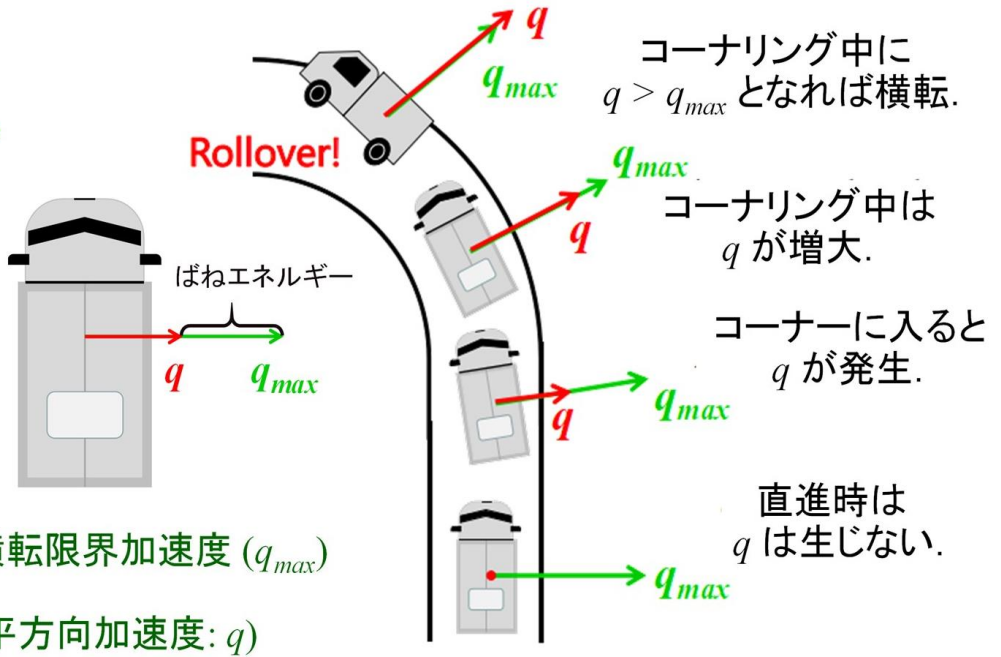
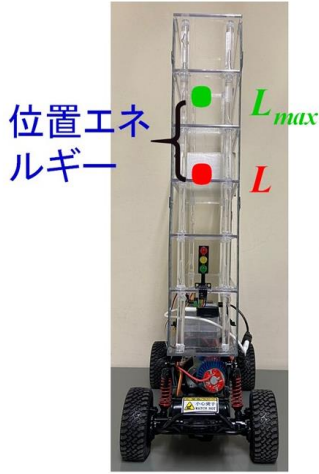
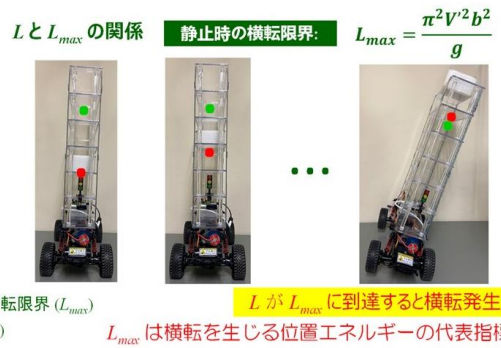
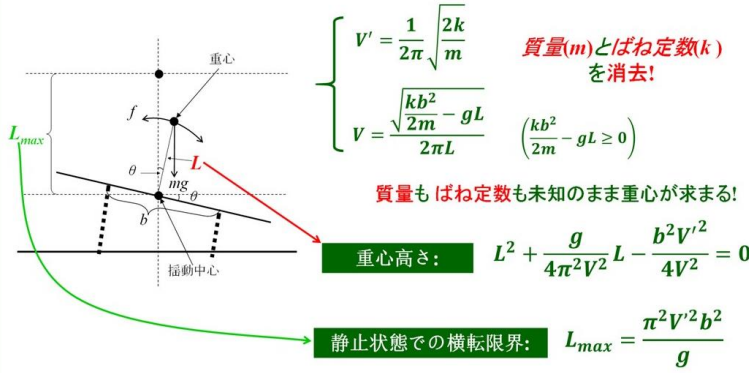
安全にコーナーを通過。

Step 4





# 三次元重心検知理論 【D3DCG】



- 走行時横転限界加速度 (q\_max)
- 横G (水平方向加速度: q)

q\_max は横転に抗するばねの復元エネルギーを代表している。

走行時

エネルギー保存の法則

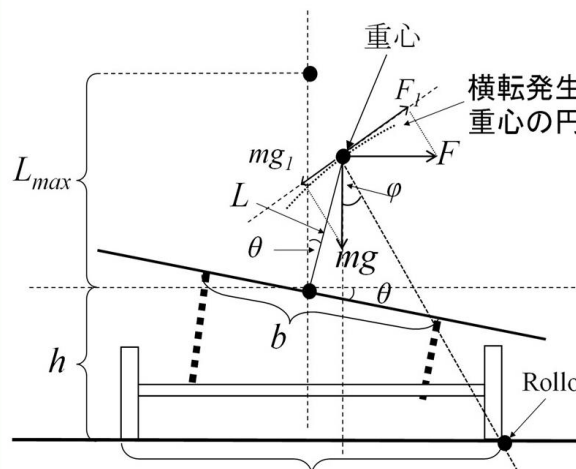
静止時

ばねエネルギーによる復元

=

位置エネルギーによる復元

走行時の横転限界を表す式:



$$q_{max}(L, L_{max}, q) = \frac{\left| \frac{w}{2} - L \sin \left[ \tan^{-1} \left( \frac{Lq_{max}}{L - L_{max}} \right) \right] \right|}{L \cos \left[ \tan^{-1} \left( \frac{Lq_{max}}{L - L_{max}} \right) \right] + h}$$

位置エネルギー要素

- q: 走行時の横G
- w: 両サイドのタイヤの縁間の幅
- h: 揺動中心軸の高さ

# 三次元重心検知理論に基づく横転防止最速自動コーナリング

Fastest autonomous cornering without causing rollover based on the Detection of Three-Dimensional Center of Gravity (D3DCG)

## 1. 課題：トラックの自動運転に不可欠な積載状態未知での横転防止技術

トラックの自動運転の社会実装実現は、ドライバー不足の深刻化から待望されています。しかし、乗用車と異なりトラックの重心位置は、日々千差万別の相違で荷台に積載される貨物により、三次元方向に大きく変位します。加えて物流の実態から過積載などの違法な積み付けは、自動運転化社会となっても避けることはできない課題です。特に大型トラックの事故の種別では、コーナリング中の横転事故が高率に上っていますし、最新型のトラックでも横転事故を生じています。

トラックの横転事故の原因は、物理学的にシンプルに説明できます。移動体には必ずどこかに重心があり、コーナーに入ると重心に横G（遠心力）が加わります。重心を下に押し付ける重力が横Gとせめぎあい、横Gが勝ればトラックはコーナーの外側へとロール方向への回転運動を開始し横転事故となります。つまり、あらかじめトラックの重心位置を知り得ているのであれば、あらかじめ力学のバランス計算ができますから、横転しないコーナリング速度等を見定めることもできるでしょう。しかしながら、上述のとおり日々千差万別の貨物が積載されますので、トラックの重心位置は、ドライバーや自動運転AIにとっては未知となります。

この課題の解決には、積み荷の重さや積載状態が未知のまま、三次元空間上の重心位置を見出す技術が必要です。

## 2. 三次元重心検知理論

その技術が、三次元重心検知理論です。この理論は海に浮かぶ船の浮動の原理に基づいています。同じ船でも航海中に燃料が減っていったり、漁船であれば沖に出てから漁獲により船が重たくなったりすれば、船の揺れ方は必ず変わります。つまり、船の揺れ方と重心位置は一対一に結びついているのです。トラックは、サスペンションとタイヤで支えられているばね構造体です。走りだせば船と同じように重心位置に応じた固有の振動や揺れを生ずるはずですが、この考え方で、重心の運動方程式を解いて導いたのが三次元重心検知理論です。質量(m)とばね定数(k)は、式の導きの過程で消去することができました。その結果、重心位置を見出すことに必要な入力値は、上下方向の加速度(Heave)、左右方向の角速度(Roll)、左右のばね幅の3つのみでよいことがわかりました。

## 3. 横転限界の存在

三次元重心検知理論では、重心は特定の周波数で揺動すると仮定しています。加えて、重心が揺動できなくなる特異点も見出すことができます。



重心の運動が周期性を失うとは、一定方向のみへと運動してしまうことになり、横転を生ずるということになります。これが横転限界です。この横転限界は、簡単な装置でその存在を調べることができます。

例えば、ホームセンターでコイルバネと木板を買ってきて、ばね台座を作ります。ばね台座の上に、軽量の物体(例えばガムテープなど)を多数積み重ねます。その中に1か所だけとても重い金属の錘をかませます。この状態で物体を手でたたくなどして揺動させ、モーションセンサで上下加速度と左右加速度を計って、三次元重心検知理論を適用します。

金属錘を一番下に配置してこの実験を開始して、金属錘の位置を一つずつ上にあげながら実験を繰り返してゆきます。そうしますと当然のことながら三次元重心理論が返す重心位置(●)はどんどん上昇しますが、横転限界(●)の位置は変わりません。そして、重心が横転限界に到達すると揺動を計測することができなくなり、物体に何も外乱を加えていないのに、物体は横転倒壊してしまいます。

#### 4. 動的な横転限界

横転限界は、トラックがコーナーを走行中に横転せずに安定を保てる復元力の限界値としてもあらわすことができます。この実証を、ホビー用のRCカーを用いて行ってみました。

RCカーのステアリングをいっぱい切り、コーナリング走行を開始します。徐々にスピードを上げてゆきます。RCカーには、揺動を計測するモーションセンサと三次元重心検知理論をリアルタイム計算するためのマイコンを設置しています。そして、横転に至るまでスピードを上げて行きます。

コーナリングによる遠心力に対する横転限界の値が $q_{max}$  (緑線)であり、上述の横転限界と同じく一定です。これは実験車両の重心位置に依存するからです。 $q$  (赤線)は重心に加わる横Gです。実験車両のスピードの上昇とともに $q$ も大きくなってゆき、 $q$ が $q_{max}$ に到達すると、実験車両は不安定な挙動を顕著に生じて、ほどなく横転しました。

#### 5. 横転防止最速自動コーナリングの方法

この実験結果から、走行中にリアルタイムに三次元重心検知理論を稼働して、絶えず $q$ と $q_{max}$ を比較してゆくことで、コーナリング中にぎりぎり横転しない最も早い速度で走り続けることが、理論的に可能であることが分かりました。そこで、 $q \leq q_{max}$ となるようにRCカーのスピードをコントロールするプログラムを組んで、自動コーナリング周回走行実験を行ってみましたところ、RCカーをぎりぎり横転しない状態でずっと走らせることに成功しました。

さらに、この実験では、RCカーの荷台を積層高層構造にして、任意の位置に錘を設置できるようにしました。つまり、千差万別の未知なる重心位置を作り出して、三次元重心検知理論を検証しました。どんな重心位置でも横転は防げ、重心位置に応じた最速走行も実現できました。