

自動車の運転とフィードフォワード制御

第1章 運転操作を制御として捉える

1-1. フィードバック制御：起きたことに対処する

「制御」という言葉は硬い専門用語に聞こえるかもしれないが、「機械などを目的の状態にするために適切な操作や調整を加え、思い通りに動作させること」を意味する。したがって、車の運転を考えることは、まさしく制御を考えることである。

自動車の運転操作を制御システムとして捉えると、ドライバーは車両の状態（速度、姿勢、ヨー、横 G など）を観測・検知し、入力（スロットル、ブレーキ、ステアリング操作）を更新する制御器として機能している。その制御は大きく 2 つの軸に分類できる。フィードバック制御とフィードフォワード制御である。

フィードバック制御は比較的馴染みのある概念だろう。車の挙動を観察し、目標との差に基づいて操作を修正する制御である。具体的には以下のような操作がこれにあたる。

- ・曲がりすぎた→ステアリングを戻す
- ・減速しすぎた→スロットルを足す
- ・リアが流れた→カウンターステアを当てる

一言で言えば、「起きたことに対処する運転」である。実際の挙動を見て修正するため、想定していなかった外乱（路面 μ の変化など）にも対応できるという強みがある。

一方で弱点も明確だ。まず、応答の遅れが不可避である。状態の認知→判断→操作→車の挙動修正という流れには、どうしても時間がかかる。次に、修正が遅れることで「修正しすぎ→逆方向への挙動変化」という蛇行やハンチング（オーバーシュート）が生じる可能性がある。さらに、限界域では破綻しやすい。タイヤの能力が飽和した後では修正操作が効かないことがあり、「滑ってから対応」では手遅れになることも多い。

1-2. フィードフォワード制御：起きる前に操作を決める

フィードフォワード制御は、車の応答を「予測」して、事前に適切な操作を与える制御である。以下のような操作がこれにあたる。

- ・コーナーの曲率を認識したうえで、進入前に適切な減速量を決定する
- ・曲率に応じたステアリング角を事前に与える
- ・立ち上がりで必要なトルクを予測してスロットルを開ける

すなわち、「起きる前に操作を決める運転」である。車の挙動誤差が出る前に入力を与えるため応答が速く、操作量が最小化されることで無駄な修正がなくなり、スムーズでエネルギー効率の高い運転につながる。

弱点は、精度の高い理解と経験（車両の特性や路面 μ の把握など）が必要な点にある。予測が外れると破綻するリスクがあり、路面変化や突発的な荷重変動といった外乱にも弱い。

1-3. 両者の役割分担と補完関係

どちらの制御が優れているということではなく、それぞれの特性を活かすことが肝要である。高度な運転技術は「フィードフォワード主体+フィードバック補正」をいかにうまく実現できるかにかかっている。

操作別に整理すると以下のようなになる。

ステアリング

- ・フィードフォワード：コーナー曲率から必要舵角を決定
- ・フィードバック：アンダーステア/オーバーステアの補正

ブレーキ

- ・フィードフォワード：進入速度・コーナー曲率から減速量を決定
- ・フィードバック：ABS 介入やブレーキロック兆候で踏力を調整

スロットル

- ・フィードフォワード：出口に必要な加速を予測して開度を決定
- ・フィードバック：トラクション不足・過多に応じて開度を調整

運転技術の向上には、(1)フィードフォワード精度の向上、(2)フィードバックの最小化、(3)両者の効率的な統合、の3点が鍵となる。

第2章 フィードバックの本質的限界

2-1. 応答遅延の分解

フィードバック制御の最大の弱点は応答の遅れである。この遅れは以下の要素に分解できる。

- ・感覚・知覚の遅延：視覚や体の感覚の応答時間
- ・認知・判断の遅延：情報からの状況評価と操作量決定に要する時間
- ・神経・筋肉の遅延：運動指令から実際の動作に要する時間
- ・機械系遅延：ステアリングや油圧系の応答時間

これらを合計すると、トータルで0.2~0.6秒になるとも言われている。100km/h 走行時に0.6秒の遅れは17mの走行距離に相当し、コーナリングの限界域では致命的な遅延となりうる。

2-2. 非線形領域でのハンチング問題

限界域より低い通常の走行領域では、操作（入力）に対して車の挙動（出力）はほぼ比例する線形領域にある。しかし、たとえばタイヤのスリップ角に対するコーナリングフォースは、限界域に近づくと急速に飽和・低下する非線形領域に入る。

この非線形領域で通常感覚のまま修正を試みると、以下のような不安定挙動に陥る。

修正操作→過修正→逆方向への偏差→逆修正→ハンチング（行ったり来たりの繰返し）

これはフィードバック制御の応答遅れと非線形特性が組み合わさることで生じる構造的な問題である。

2-3. 限界域での制御破綻

タイヤの能力が飽和した後では、修正操作そのものが効かなくなることがある。「滑ってから対応する」アプローチでは、対応できる時間的余裕が残っていないことも多い。

これこそが、フィードフォワード制御を運転技術に持ち込む根本的な理由である。結果が顕在化してからでは遅い局面が存在するのであれば、結果が出る前に適切な入力を与える制御が不可欠となる。

第3章 荷重という支配変数

3-1. 静的重心と動的荷重中心の違い

現実の車は、加減速・旋回時のジオメトリー（部品や車体の幾何学的な位置関係）やコンプライアンス（サスペンションを含むゴムやばねの要素の動き）が複雑に絡み合って挙動する。それをすべて個別に把握してコントロールするのは現実的ではない。

そこで最も支配的な要素として注目すべきは、「4輪それぞれにどれだけ荷重が乗り、その結果として各タイヤがどれだけの横力・制動力・駆動力を発揮できるか」という点である。

一般的にフロントとリアの重量配分が議論され、スポーツカーでは 50:50 が理想とも言われる。これはいわゆる「静的重心」であり、車の各部品の配置と質量によって物理的に決まる値だ。この静的重心は車の挙動変化（ロール、ピッチ、ヨー）によって微妙に変化するが、その変化量はごくわずかである。

一方、運転操作において本質的に重要なのは「動的荷重中心」とも呼ぶべき量であり、これは車の挙動変化によって大きく変わる。そして、この動的な荷重こそがタイヤと路面の関係を左右する支配変数となる。

3-2. 加減速・旋回時の荷重移動

車の挙動と荷重の関係を整理すると、以下のようなになる。

制動時：ブレーキ操作によって後輪が大きく抜重され、グリップが低下する。

初期制動時に強く踏みすぎると、フロントの荷重が立ち上がる前に

強いブレーキが入ることになり、ロックしやすくなる。

加速時：後輪が加重・前輪が抜重されるため、

FR：駆動輪の荷重増加→トラクション向上に有利

FF：駆動輪が抜重→トラクション確保に不利

AWD：前後の駆動力配分に応じて荷重配分を活用可能

旋回時：ロールが発生し、旋回外側に荷重移動が生じる

3-3. タイヤの非線形グリップ特性

タイヤの垂直荷重とグリップ力の関係は、低荷重では比例するが、荷重が増えるにつれてグリップ力の増加率が鈍り、あるポイントを超えると逆に低下するという非線形特性を持っている。

したがって、比例関係の領域からやや飽和が始まるあたりの範囲でタイヤを適切に使うことが、荷重コントロールの大前提となる。飽和を超えた領域での操作は予測しにくく、制御の破綻につながりやすい。

3-4. 荷重こそが先読みの対象である

車のコンタクトパッチ（タイヤと路面の接地面）は、すべての挙動のインターフェイスである。ドライバーはスロットル・ブレーキ・ステアリングしか操作できないが、これらの操作を通じて荷重移動の発生のをさせ方をコントロールできる。

ステアリングを操作してから車が「曲がった・曲がらない」「リアが出た・出ない」として結果が現れるまでには、以下の連鎖が生じる。

1. ステアリングを操作する
2. 前輪にスリップアングルが発生する
3. 横力が発生し始める
4. 車体にヨーモーメントが入る
5. 横加速度が発生する
6. 左右の荷重移動が進む
7. 前後輪の余裕差が変わる
8. アンダーステア/オーバーステアの傾向として顕在化する

入力してからかなりの時間が経過して初めて結果が現れる。旋回限界付近では、結果が見えた時点ですでに荷重移動やタイヤ余裕の配分に変化が生じており、その後の修正では間に合わないことがある。

これがフィードフォワード制御を持ち込む最大の根拠である。結果ではなく、結果を生み出す荷重状態を事前に予測して操作することが、限界域での制御の鍵となる。

第4章 フィードフォワードの本質と実装

4-1. 「早く操作する」ではなく「荷重状態を先に作る」

フィードフォワードは単に「早めにハンドルを切る」「早めにブレーキを踏む」ということではない。本質は以下の点にある。

「この入力を入れると、そのあとにどのような荷重状態・グリップ状態・姿勢状態になるかを先に見て操作すること」

先読みの対象は「路面の先」だけではなく、次のような車両内部状態の未来である。

- ・前輪がどれだけ仕事を始めるか
- ・リアの接地余裕がどのくらい減るか
- ・荷重移動が急か緩やかか
- ・車体の回頭が立ち上がる速度はどうか

大きな目標である「軌跡をなぞる」ために操作するというよりは、「望ましい荷重移動を先に作る」ために操作すると捉えるのが正しい理解である。

コーナリングを例にとると、先読みすべき事項は以下の4点に集約される。

1. 前後荷重の移り方

ブレーキをどれだけ残すか、いつ抜くかで、フロントの入りやすさとリアの安定余裕が変わる。

2. 左右荷重の立ち上がり方

急な舵角変化は急激な左右荷重移動を起こし、外輪だけに仕事が集中しがちになる。滑らかに操作することで荷重移動が整い、4輪を機能させられる。

3. ヨーの立ち上がり

現在の舵角ではなく、この舵角入力の後にとどれだけ回頭が出るかを見る。

4. タイヤ余裕の残り方

今の入力が「どの輪の余裕を先に削るか」を予測して操作を行う。

4-2. 内部モデルの三層構造

フィードフォワードを効果的に機能させるには、「入力に対して車の挙動がどのように変化するか」を高い精度でモデル化できていることが前提となる。このモデルは以下の三層で構成される。

軌跡モデル

コーナーの曲率変化を事前に認知・記憶し、必要なステアリング舵角を先行入力する。

「視線を先に送る」という操作は、この入力精度を高めることに他ならない。

タイヤ特性モデル

路面温度・タイヤ温度・垂直荷重からコーナリングフォースの限界値を推定し、スロットルやブレーキの操作量を先行的に決定する。

車両動特性モデル

ステアリング入力に対するヨーレート応答の遅れ、ブレーキによる荷重移動の遅れを把握し、応答が来る前に次の操作を準備する。

4-3. 操作別フィードフォワードの実装

以上の内部モデルを踏まえ、各操作にフィードフォワードを実装すると以下のようになる。

ブレーキ

単に速度を落とすためだけでなく、ターンイン時にフロントへ必要な仕事をさせるための前荷重を準備する操作として捉える。抜き方は、回頭が必要なタイミングに合わせ、フロント荷重を失いすぎず、リアを急に不安定化させないように整える。

ステアリング

回頭を起こしたいタイミングより少し前から、荷重移動とヨーの立ち上がりを見越して舵を組み立てる。重要なのは最大舵角よりも、入れ始めの速さと増し方である。すなわち、入力値（舵角の大きさ）の正しさではなく、入力値の時間軸での変化の様子が正しいかを意識することが実現への鍵となる。

スロットル

立ち上がりの加速だけでなく、リアタイヤの縦横力配分を崩さず、車両姿勢の安定側に導きながら駆動を立ち上げる操作として捉える。

早めにオープンするとリア荷重増によりアンダー傾向が出ることも念頭に置く。

ブレーキング→ターンインの場面を例にとると、フィードバックのみでは荷重移動を感じてからステアリングを切り始めるが、フィードフォワードを組み込むと、ブレーキを踏むと同時に「この速度・この荷重移動量なら 0.3 秒後にフロントのグリップは最大になる」という予測に基づき、ステアリング入力のタイミングを先行して決めることができる。

4-4. 操作間の結合

複数の操作を入力することは不可避であるため、操作を完全には分離せず、ある入力を変えたとき他の入力をどう変化させるかをセットで考える必要がある。代表的な結合例を以下に示す。

- ・ブレーキを残す→フロント荷重増→ステアリング初期応答増
- ・スロットルを早めにオープン→リア荷重増→アンダー傾向
- ・急なステアリング操作→左右荷重変化急変→リア不安定化

フィードフォワードの思考順序を整理すると以下ようになる。

1. 目標：このコーナーでどの輪にどれだけ仕事をさせるかという横力分布の実現
2. 必要条件：それを成立させる荷重配分とスリップアングルの範囲の認識
3. 操作：それを実現するための
 - ・ブレーキの残し方（前荷重の準備）
 - ・舵の立ち上げ方（左右荷重移動の変化割合）
 - ・スロットルのつなぎ方（後輪余裕の維持）

フィードフォワードが操作の骨格を形成し、フィードバックが誤差を修正する役割分担においては、フィードフォワードの精度が上がるほどフィードバックによる補正量は小さくなり、結果として滑らかで速い走行が実現される。

第5章 精度向上のための思考と訓練

5-1. 入力情報の質：視覚の先行化と非視覚感覚の精緻化

フィードフォワードの精度を決める第一の要素は、入力情報の質である。最大の入力ソースは視覚であり、目線がどれだけ先を見ているかが直接フィードフォワードの時間的余裕を決定する。具体的な訓練として以下が有効である。

- ・コーナー進入時、クリッピングポイントではなく、その先の脱出区間を見る訓練を意識的に行う。
- ・目線の移動タイミングを「早すぎる」と感じるくらいまで先行させ、その状態で車両がついてくる感覚を体験する。
- ・直線では2～3コーナー先を視野に入れ、操作の準備を始める時間的余裕を作る。

視覚以外の感覚（加速度感覚、操作系からの手ごたえ、聴覚、振動など）の精緻化も並行して行うことが望ましい。

5-2. 内部モデルの精度：予測→実走→検証のサイクル

精度向上の第二の要素は、内部モデルの精度である。以下の前提情報を正しく持つことが重要となる。

- ・路面やタイヤの利用可能グリップ
- ・荷重移動の起こり方（量と速さ）
- ・車両の回頭特性（前後の余裕配分）
- ・入力に対する応答の時間スケール

これらの前提を高める具体的な観点を以下に示す。

路面 μ とその分布の把握

絶対的な μ （路面の乾き・濡れ・砂・温度など）、 μ のばらつき、走行ラインでの μ の変化を高精度で把握することで、「ここならこのくらいの横力・縦力が出せる」という前提が確立できる。

タイヤの使い方

ピーク手前でタイヤをうまく使う感覚を磨く。荷重が増えてもグリップが増えなくなるポイント、スリップアングルの変化と挙動の相関、縦横同時使用時のトレードオフ（トラクション円）などに着目する。

荷重移動の量と速さの予測

急激な移動は一部のタイヤが瞬間的に飽和するが、緩やかなら4輪で分担できる。量と時間の両方を常に意識する。

車両の前後バランスの理解

フロントが先に限界に近づく車か、リアが先に余裕を失う車かを把握する。
ブレーキ中・オフスロットル・オンスロットルで特性がどう変わるかも含めて理解する。

応答の時間スケールの把握

正しい量の操作でも、タイミングがずれれば誤った結果を生む。

- ・ 舵→ヨー発生までの遅れ
- ・ ヨー→横G立ち上がりの遅れ
- ・ 荷重移動の遅れ

これらを把握することが極めて重要である。

モデルの精度向上にはデータロガーの活用が有効である。操作入力と車両応答のタイムラグが自分の感覚と一致しているかの確認、スロットル開度の滑らかさ（フィードバック修正が多いほどギザギザになる）、ステアリング角度の単調性（切り増し・戻しの繰り返しはフィードバック補正が多い証拠）、横Gの変化率（急変は想定外の事態への対応を示す）などを定量的に確認する習慣をつけることで、モデル誤差を客観的に把握できる。

また、限界手前での意図的な探索走行も有効である。同一コーナーを意図的に異なる速度・進入角度で走り、応答の変化を観察する。「限界を超えてから修正する」のではなく「限界の手前でグリップがどのように変化するかを感じる」ことを意識して走ることで、グリップ限界の予兆（セルフアライニングトルクの減少、ヨーレートの頭打ちなど）を識別できるようになる。

5-3. モデル出力の実行精度：再現性と分解能

精度向上の第三の要素は、操作の再現性と分解能である。

操作の再現性を高める

同じ場所で同じ操作をすることを基本とする。ブレーキングポイントやステアリング入力タイミングを固定化し、まずは低速・低負荷で操作を完全に固定化してから速度を上げる。操作のパターンを先に固めてから負荷を上げていく順序が重要。

操作の分解能を高める

- ・ ステアリング：指・手首・腕全体の協調動作を意識し、
「どの部位で舵角をコントロールしているか」を明確にする。
- ・ スロットル：踏み込み量と開度の関係を体感として精緻化し、
足首の微妙な動きで開度をコントロールする感覚を磨く。
- ・ ブレーキ：踏力の初期立ち上がり速度のコントロールに注力する。

5-4. フィードバックの「次周回への転用」

フィードバックはフィードフォワードで行った操作の補正が第一義である。しかし、フィードフォワードの質を高めるという観点からは、「その場の修正」に留まらず、「次の周回のための前提修正に活用する」という視点が大きなポイントとなる。

実走中に生じた誤差（予測と結果のずれ）をフィードバックとして認識し、それを次の周回のフィードフォワード前提の修正に反映させる。このサイクルを意識的に回すことで、内部モデルの精度が継続的に向上していく。

なお、サーキットや走り慣れた峠道では路面の変化（曲率・路面 μ など）を把握できていることが多く、フィードフォワードの利点が発揮しやすい。一方、初めて走る場所では先の状態予測が困難であるため、より多くをフィードバック補正に頼らざるを得ない点には注意が必要である。

第6章 まとめ：因果を時間軸で持つ技術として

フィードフォワード制御に基づく運転技術とは、「ドライバーが車両の将来の状態を予測し、その状態を望ましい範囲に導くように先行入力を与える操作技術」である。

その機能の良否は、「操作→荷重変化→タイヤ力→車両応答」という因果連鎖を、時間軸とともにどれだけ正確に内在化できているかによって決まる。

フィードフォワードの精度が上がるほど、フィードバックによる補正量は小さくなる。この両者は逆相関の関係にある。スムーズで速い走りが少ない修正操作で実現されるのは、フィードフォワードの精度が高いことの自然な帰結である。

熟練とは内部モデルの精度（何が起きるかを正しく知っていること）と実行精度（それを正確に操作として出力できること）が同時に高まった状態を指す。そのためには、予測に必要な情報の把握・判断能力の向上・操作の分解能の向上という三方向の訓練を継続し、走るたびに内部モデルを更新し続ける姿勢が不可欠となる。