

障がい者の人たちの自由なモビリティを実現する福祉メカトロニクス

東京理科大学 工学部 電子工学科 教授 和田 正義 わだ まさよし

1. はじめに

車いすなどを使用している障がい者のうちでも特に重度の障がいを伴っている人々にとっては、個人が移動できる範囲に制約が伴い、社会活動や社会参加の機会が制限されてしまう。障がい者自身による自動車の運転が可能になれば、公共の交通機関による移動の不便さを回避し自由で広い範囲の移動ができるので、身体的・精神的な負担軽減と障がい者の自立が促進できる¹⁾ばかりでなく、家族などをはじめとする介護者や介助者の負担を軽減することも期待できる。

障がい者自身による自動車の運転に関しては、主に足の運動機能に障がいのある車いす利用者を対象として、両腕を用いてハンドル・ペダルの操作を可能とする運転補助装置（通称、手動運転装置）が開発され市販されている。この手動運転装置は機械リンク式の構造により、手の動作でペダルを作動させるもので装置単独で製造され、様々な車種に後付けで装着することで自操式福祉車両を実現する。

しかしながら、この手動運転装置は両腕が健常者並みに使用できる人が利用可能であり、重度の障がい者にとっては依然として自動車の運転は困難な状況であった。しかしながら、このような障がいを抱えた人たち自身による自動車の運転を可能とする装置の実現を希望する声は強い。

そこで当研究室ではロボット・メカトロニクス技術を応用して、重度の障がい者の人たちにも自動車の運転を可能とするシステムの研究開発を行っている。本報では、軽い力、小さいストロークで操作できるジョイスティックを操作することで、電気モータを駆動、

制御し、ハンドルの回転操作、およびアクセル・ブレーキペダルの作動を行い自動車を運転する、ジョイスティック式自動車運転システムを紹介する。

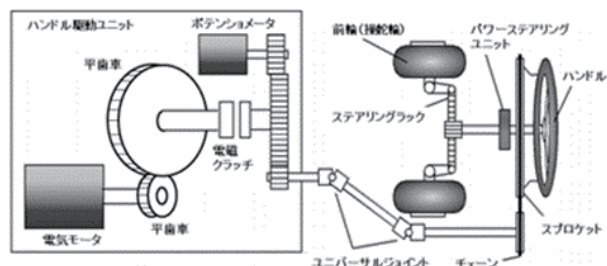
2. ジョイスティック式自動車運転システム

研究開発したシステムの特徴は、車両に備えられる蓄電池から供給される12V単一電源で動作することに加えて車両に後付けで設置できること、さらに様々な車種や障がい者の多様性に適用可能であることなどを視野にいたった設計を行っていることである。

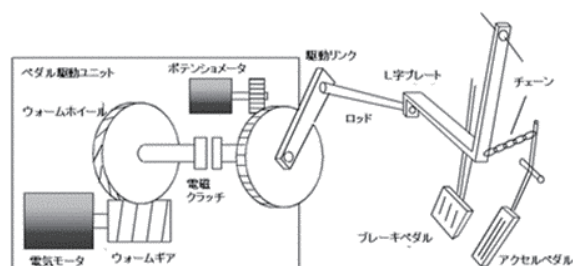
ジョイスティック式自動車運転システムはハンドルの駆動制御、およびペダルの駆動制御を行う2つのサブシステムから構成される。ハンドル駆動用のシステムにおける動力伝達の構成を【図1】に示す。電気モータのトルクはウォームギア、電磁クラッチ、歯車、ユニバーサルジョイント、そしてスプロケットチェーンをそれぞれ介してハンドルに伝達される。車両に標準装備されるパワーステアリングの機能も有効に利用する構造となっている。手を離れたときジョイスティックのレバーが直立状態に復帰するようばねを備える構造とし、かつハンドルの制御には角度制御を施している。

一方、ペダル駆動システムにおいては、L字プレートを設置しこれを前後方向に駆動することで、アクセル、ブレーキの2つのペダルを1つの電気モータで駆動できるようになっている【図2】。ハンドル、ペダルの各々の駆動システムは独立して動作するそれぞれ1つずつの電気モータが備えられる。

市販のモータ制御装置は通常、異常時においてもモ



【図1】ハンドル駆動システムの構成



【図2】ペダル駆動システムの構成



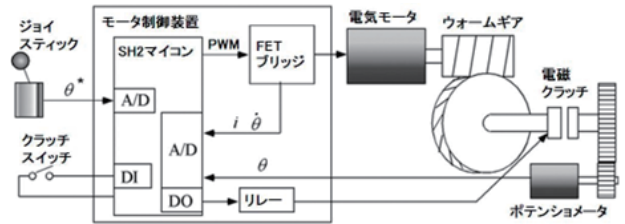
【図3】ジョイスティックシステム制御基板

ータの損傷を防ぐように設計されており、異常検出時には、モータの動作を即座に停止するように考えられている。しかしながら、本研究で開発するシステムでは、安全を優先する対象はモータではなく、走行している車両ならびに搭乗者である。よって、モータなどにある異常が検知された場合であっても、モータの動作を即座に停止するのではなく、モータを何とか作動させて車両を安全な場所に移動させることができるようにすることが重要である。この目的のため、この研究開発においては専用の基板を設計開発した。その外観を【図3】に示す。

制御の基本はジョイスティックの傾斜角度に比例してハンドルやペダルをモータで作動させるものであるが、後述する車両速度に応じた操舵角制限機能や可変感度関数などの計算や処理を行う。運転者が操作するジョイスティックの傾斜角度とその方向に従い、各モータの角度がジョイスティックからの角度指令に追従するようそれぞれPID制御を施している。制御系の構成を【図4】に示す。

ジョイスティックは2自由度のもの1本、あるいは1自由度のもの2本、さらには、他の入力デバイスなどの対応も可能である。運転者の障がいの度合いに応じて、ハンドル、ペダルのどちらか一方のジョイスティック化や、従来の機械式の手動運転装置との併用またはハンドル、ペダルをそのまま使用する運転方法との組み合わせも可能である。

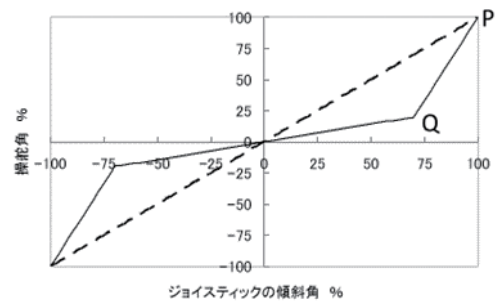
【図5】には、2本の1自由度ジョイスティックによる運転システムを実車両へ搭載した様子を示す。右のジョイスティックはハンドル駆動用であり、左右方向に操作すると、ジョイスティックの傾斜角度に比例した角度までハンドルが回転する。また左のジョイスティックはペダル駆動用であり、前後方向に操作すると、車両前方向に傾けるとブレーキ、後ろ方向に傾けるとアクセルペダルがそれぞれジョイスティックの傾斜角度に比例して作動する。



【図4】ジョイスティックシステム制御構成



【図5】ジョイスティックシステムの車両搭載の様子



【図6】ジョイスティック感度関数

3. ハンドル制御系

安全で快適な自動車の運転を実現するためにハンドル制御に各種機能を開発し、搭載している。

まず、ジョイスティックからハンドルの回転角指令を算出するための基本感度関数について説明する。ジョイスティックの傾斜可能領域は、片側約25°程度である。一方、ハンドルの回転は片側540°(1.5回転)程度である。駐車等の際には、最大までハンドルを回すことが要求されるので、ジョイスティックをいっぱい傾けたとき、ハンドルが最大角度まで回転することが必要である。これを単純に比例関係としてグラフにすると、【図6】内の点線で表した直線になる。この直線に従ってジョイスティック操作に比例してハンドルを回転させ自動車を走行させようとするとき、操舵輪の感度が高くなりすぎて低速走行においても自動車が蛇行してしまうことが観察された。このため、操舵角がジョイスティックの中央付近(車両の直進付近)、の緩やかな曲率で走行する際に使用する領域(【図6】

のQ点まで)においては微妙なハンドル操作が可能ないように感度を低下させる一方、駐車の際のような場合には動作領域の端までハンドルが切れるよう、両端付近の感度を上げ、全領域動作が操作可能のように【図6】のQ点とP点を結ぶ折れ線関数を設定し、これを基本の感度関数とした。

3-1. 操舵角制限機能

運転者は、ジョイスティック操作によりハンドルを回転駆動するが、誤操作の可能性は完全に排除することはできない。また、車両速度によらず上述の基本感度関数を用いた場合、ジョイスティックの操作力の軽さおよび動作領域の小ささから、ジョイスティックに何かがぶつかるあるいは誤操作などの突発的な要因により、とすると高速走行時に急激なハンドリングが発生し車体横転する危険性がある。これを防ぐために、車両速度に応じてハンドルの最大許容角を制限し車両運転の安全性を向上させた。

ここでハンドル操作に動作制限を設けるためには、車両の運動状態の危険度を評価する方法が必要となる。ここでは、車両の力学モデルから横転の危険性を判定する方法を考案した。安定限界における車両速度 V に対する操舵角 δ_{lim} は以下のような関数により与えられる(詳細は参考文献²⁾を参照)。

$$\delta_{lim} = \tan^{-1} \left(\frac{gWL}{2hV^2} \right)$$

この関係式によって車両速度に対する操舵角の限界値を計算すると、【図7】に示すような曲線が得られる。

これは図中の曲線より下の領域である車両速度—操舵角の関係性を維持すれば、車両横転の危険性がないことを意味する。通常の車両の操舵輪は 35° 程度が限界であるので、実際は理論的な操舵角限界が 35° 以下になる速度域から制限が有効になる。この操舵角制限は、【図6】に示した基本感度関数のP点を車両速度に応じて下げることの意味している。

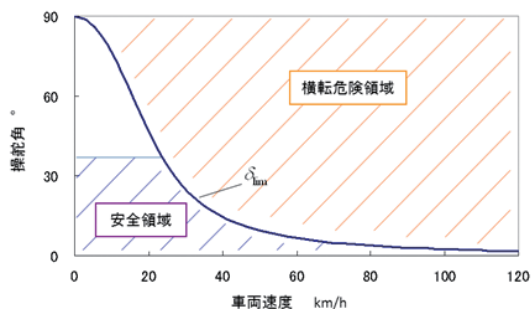
3-2. 可変感度機能

可変感度機能は、広範囲にわたる車両速度域に対して、車両走行の安定性と操作性を維持するための機能である。【図6】に示した基本感度関数で、P点は3-1節で説明した操舵角制限機能によりその位置が決定される。一方、感度関数は折れ線で構成されていることから、その折れ点であるQ点は、P点とは独立にその位置を決定でき、以下の方法により行っている。

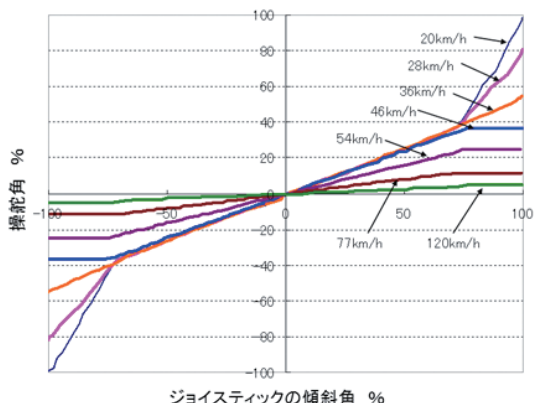
基本感度関数において車両速度上昇に伴いP点が下に移動し、Q点と同じ高さになるまではQ点を固定とし、それ以上車両速度が上昇した場合には、線分PQがグラフ横軸と平行になる状態を維持してP点とともにQ点を下降させる。

この方式により車両速度に応じてP点、Q点を各々決定し感度関数を可変にした場合の感度関数の変化を【図8】に示す。

以上で説明した2つの機能を備えた感度関数をジョイスティック式自動車運転システムに実装した。



【図7】車両速度と操舵角の安全領域



【図8】車両速度と感度関数の関係

4. 安全設計

ジョイスティック式自動車運転システムの基本構成は、運転者が操作する1本、もしくは2本のジョイスティックから送信される2自由度の指令に基づき、ハンドルを回転する第1の電動モータと、アクセル・ブレーキを作用する第2の電動モータをそれぞれ駆動制御するものである。よって、運転者はハンドルやペダルなどの自動車の本来の操作装置に物理的に触れることなく自動車を運転することになる。このような運転者と操縦装置の間に物理的・機械的な結合がなく、電気・電子的な制御装置を介した信号伝達によ

り操作が行われるシステムを一般的にバイワイヤ方式と呼ぶ。開発したジョイスティックで操縦する自動車においては、ハンドルとペダルつまりオートマチックトランスミッションの自動車における走行に関わるすべての操縦装置をバイワイヤ方式にするということであり、そこで重要となるのは装置の安全性確保である。自動車の走行中にハンドルが回転しなくなるまたはペダルが作動しなくなる、などの事態は決して起こってはならない。安全設計として行った主な3つの項目を以下説明する。

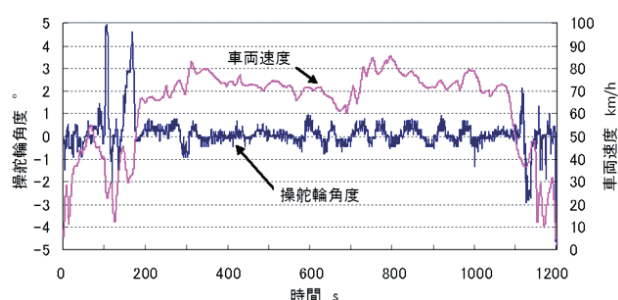
- ① センサの二重化：ハンドル角度，ペダル踏込量の検出，およびジョイスティックの操作検出を行うための角度センサを全二重化。
- ② センサ，クラッチ配線の断線検出：センサ，およびモータ動力を伝えるクラッチの配線が断線していないかを常時監視する。
- ③ 空気圧式緊急ブレーキ：圧縮空気によりブレーキペダルを作動させる緊急停止ブレーキを装備し，電源喪失時にも車両を停止させることができる。ジョイスティックのブレーキ操作側の終端に作動スイッチを設置し，ジョイスティックから手を離さなくとも緊急ブレーキを作動させることができる。

5. 車両走行試験

以上で説明した，操舵角制限機能および可変感度機能をハンドル制御システムに施したジョイスティック式車両で走行を行った際の走行データを【図9】に示す。走行記録時間は1200秒で，高速道路にてサービスエリア間を走行したデータである。走行開始時および1200秒付近では走行開始・終了付近で車両速度が低くなっており，その際の操舵輪角度（前輪の舵角）は5°程度の操舵が行われている。一方，300秒から1000秒の間では，60～85 km/hで高速走行を行っており，このときの操舵輪角度は±1°以内でハンドル制御がなされていることがわかる。また，運転者による緩やかな方向調整がなされているものの，蛇行のような不安定動作は確認できず，安定して高速走行が実現できていることが確認できる。

6. 技術展開

これまでに，障がい者自身による自動車の運転を可能とするジョイスティック式自動車運転システムについて説明した。このシステムでは，運転者のジョイス



【図9】ジョイスティック操作による車両走行

ティック操作を電氣的にコンピュータが読みとり，電気モータにて車両のハンドルとペダルを作動させることにより車両の走行を実現する。このシステムは福祉車両にとどまらず，近年注目されている遠隔操縦や自動運転の分野にも展開され始めている。特に，車両が高額でかつ耐用年数が長いバスや各種作業車は，人間の運転者が操縦する既存の車両を改造して無人の車両運行を行う需要が多く，これらの分野への展開を今後積極的に推進してゆく。

7. おわりに

本報では，ジョイスティックで運転する自動車について述べた。重度の障がい者自身による自動車の運転を実現するために，ロボット・メカトロニクス of 電動モータ制御技術を応用し，自動車のハンドルやペダルを電気モータで作動させることで，軽い力，小さなストロークでのジョイスティック操作による自動車の運転を可能とした。

ジョイスティック入力からハンドルの回転角を算出する関数を車両速度に対して可変にする操舵角制限機能と可変感度機能を考案し，安全で操作性のよい運転を実現した。本報で紹介したジョイスティックで運転する自動車は現在(株)ミクニ ライフ&オートから販売されている³⁾。

今後の技術展開として特殊車両の無人運転への応用を目指し，さらに研究開発を推進してゆく。

【参考文献】

- 1) JOY-VAN全国キャラバン「地域生活の新たな支援システムの研究」報告書，(財団法人)日本財団
- 2) 和田，亀田，斎藤，“ジョイスティック式自動車運転装置による操舵制御に関する検討”計測自動制御学会論文誌，Vol. 49. No. 4, pp. 417-424, 2013.
- 3) (株)ミクニ ライフ&オート“ジョイスティック運転装置”https://www.mikuni-la.co.jp/auto/products/joystick_drv/ (2023. 1. 9閲覧)