

自律走行車の身体に基づく環境表現による定性的移動計画

Qualitative Driving on Body-Centered Representation of Environment

魏 世杰* 大澤 幸生* 八木 康史* 谷内田 正彦*
Shih-Chieh Wei Yukio Ohsawa Yasushi Yagi Masahiko Yachida

* 大阪大学大学院基礎工学研究科
Graduate School of Engineering Science, Osaka University, Osaka 560-8531, Japan.

1997年7月11日 受理

Keywords: qualitative reasoning, unknown environment, robot control, planning.

Summary

Mobile robots are expected to run in environments where unexpected scenes or obstacles may occur which disturb the exact measurement of distances in the space. In such an environment, it is difficult for a robot to move tactfully, avoiding obstacles e.g. walls, columns, etc. In order to achieve such tactful movements, it is desired that a mobile robot can focus attention to meaningful points around itself, and plan its own movement toward the goal. A key point for such an intelligent recognition-based control is to represent the *meaning* of the environment for the robot, i.e., whether visible objects help or disturb the robot's movement. In this paper, we present a qualitative reasoning based driving, for a mobile robot to park in an unknown, small square parking lot. The environment, observed by the omni-directional vision of the robot, is segmented according to the motion capability and shape of the robot, to generate a robot-centered logical description of the environment. In experiments, we obtained accurate, safe and efficient parking behaviors due to this description, in various simulated parking lots.

1. はじめに

運転手がいなくても安全に自律走行できる自動車が実現すると、視覚や筋肉に障害のある人でも車で移動でき、鉄道の敷かれていない地域で生活できるようになる。あるいは、全くの自律走行でなくても、運転の初心者でも安心して運転できるようにハンドル操作などを運転者に指示する自動誘導システムは、道路交通の潤滑化への大きな貢献が期待できる。即ち、移動計画を自動生成する走行車（以下、これを自律走行車と呼ぶ）は重要な社会的使命を担っているのである。

本論文の目的は、自律走行車にいかにして次の二つの能力を同時に持たせるかを考えることである。

能力1 小回りがきかないにもかかわらず狭い場所で移動する能力。

能力2 環境の（車体に対する相対的な）位置情報が不確定でも、能力1を発揮する能力。

能力1が必要なのは、自動走行車が走行する環境には壁などの障害物が密集していることが多いためである。これは、従来から難問とされてきた回転半径が0でない運動物体を狭い空間で運動させるという問題（非ホロノミック拘束下での制御問題）に当たる。

又、能力2は、天候や時刻によって見かけが変化する一般道路や車庫（例えば、車庫が暗くなると柱の一部しか見えず、そのせいで奥行きが視覚センサでは正確に計測できなくなるかも知れない）で自動走行車の移動計画を立てるために必要である。というのは、パラエティに富む環境では天候や時刻の様々な変化を全て考慮することは事実上不可能であるから、見かけの車庫から実際の奥行きを正確に確定することができないからである。

そこで本論文では、非ホロノミック拘束下での制御問題を環境の位置情報が不確定な場合に実現することを狙う。具体的には、不確定な環境の位置情報を頼りとした車庫入れ問題を扱う。

車庫入れ問題とは、自律走行車を車庫に入れるにはどの様に移動計画を立てればよいかという問題である。車庫入れ問題自体は、従来から非ホロノミック拘束下での制御問題の代表的な例題として研究されてきた。多くの研究 [Fraichard 93, Latombe 91, Levitt 90] では、あらかじめ与えられた車庫の地図を元に移動計画を立てるため、位置情報の不確定な車庫に入ることはできなかった。自律走行車から見た車庫の局所的なセンサ情報を頼りに、車の回転角度や移動速度を制御して入庫させるという研究 [Gorinevsky 96, 山本 94] もあるが、センサで環境の正確な位置情報が得られることを前提としている。したがって、能力1, 能力2を同時に達成しようとする本研究は、これら従来研究の車庫入れよりも困難な問題に挑むことになる。

能力2を実現する為にわれわれは、環境の定性表現を用いる。その理由は、環境の位置情報に不確定さの幅があっても、その幅より精度の粗いであろう（環境の位置の数値情報を捨てた）定性表現を採れば、環境を表現できる可能性が出てくるからである。

そして、能力1を実現する為には、センサ情報から自律走行車のゴール到達にとっての意味（目の前の物体が入庫の目印として使えるか、あるいは障害となるかなど）を明示的に取り出すのが有効である。即ち、定性推論によって入庫行動を計画し、各時点で自動走行車が安全にゴールに向かっているか、何のために動いているのかを常時把握しながら行動するようにする。これにより、環境を漫然と認識しながら行動するより効率的で安全かつ正確に行動できると期待される。実際、不測の事態に対応しながらのプラント制御に定性推論の枠組が役立つことが従来から示されている [鈴木 93]。

本論文の以下の構成をここで簡単に述べる。先ず2章で、自律走行車の車庫入れの問題を定義する。次に3章では、この問題で環境をどの様に定性表現するかを述べ、その表現方法が車庫入れ問題において持つ意味を説明する。4章では、この定性表現に基づく推論をどの様に運動計画に用いるかを具体的に述べる。5章では、シミュレーション実験によって以上の表現と推論による自律走行車の運動計画が安全・正確かつ効率的な運動に繋がることを示す。

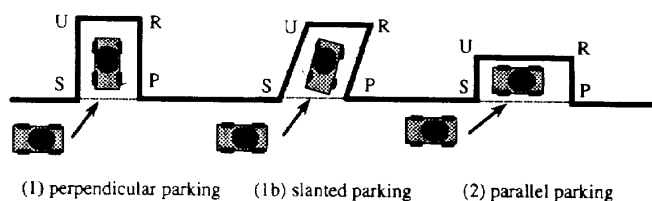


図1 対象とする車庫の形状

2. 本論文で扱う車庫入れ問題

われわれが扱うのは以下の様な、詳細情報の未知な車庫へ車体を入れる問題である。

- **環境（車庫）** 車庫は四角形で、四つの角（地面に対して垂直。図1の様に、それぞれの角に P, R, U, S とラベル付けする）とその間の3面の壁を有する。 SU と RU のどちらが長い、即ち車庫が縦型（perpendicular）あるいは斜め（slanted）か、それとも横型（parallel）かという粗い情報は、入庫前の簡単な観測により分かっているとす。しかし、車庫の奥行き（辺 SU の長さ）や幅（辺 PS の長さ）、および車庫の内壁と車庫外の壁の角度（ SU と PS のなす角度）の詳細は未知である。
- **入力（センサ情報）** 入力装置として図2の全方位視覚センサ（詳細は [Yamazawa 95] 参照）を持ち、車体より上の視点から周囲360度の全てが同時に見えているので、壁で隠れていない角は全て見えているとする。例えば、車庫内では車庫の四つの角が全て見えるが、車庫外の壁に沿って道路を車庫の入り口に向かって進む場合は、角 S と角 P の二箇所しか見えない。実際、実世界で自分の周辺しか見えないロボットが行動するには、オクルージョンや視野の限界のせいでこのような局所情報だけを頼りに行動しなければならない。
- **自律走行車の行動** 右へ前進 (+ r)、左へ前進 (+ l)、前進 (+ s)、右へ後退 (- r)、左へ後退 (- l)、後退 (- s) の6通りの行動のうちの一つを各時点でとる*1。
- **制御用知識** 現在の状態と直後に実現したい状態を基に行動を決定するために、環境変化のルールを制御用知識として準備している。この知識は式(1)のホーン節で与えられ、各時点の環境の状態は、車庫のどの角が車から見てどの区域(3章)にあるかで表される。

$$\text{次の状態} \leftarrow \text{現在の状態, 行動.} \quad (1)$$

*1 人間の運転手であれば、これらの中間などの微妙なハンドルさばきをしたり、速度を調節したりするが、ここでは運動性能を高めることではなく、環境を適切に定性表現することによる未知車庫での正確な動きを狙う。この為、移動速度とハンドルの切り角度は一定とする。

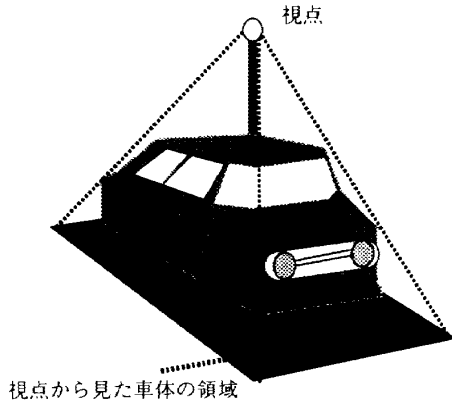


図2 用いるセンサ（全方位視覚センサ）から見て車の占める範囲。地面の影の部分に入った障害物を、接触直前とする

3. 環境と自動走行車の移動の定性表現

車から見た環境の各時点での状態を定性表現で表す。この状態表現が、やはり同様に定性表現されたゴール（入庫達成）状態に一致するまで移動する行動の時系列が、車庫入れ問題の解となる。車と壁との接触も定性表現されて、回避すべく制御される。

センサ情報と行動の記号表現に基づく推論によってロボット制御を行うという方法は、ロボットにとっての環境の意味を正確に表現する記号表現が用意されさえすれば、行動計画の強力な道具となる [Caines 95, Dean 90, Fikes 71, Poole 95, Sandewall 89]。なぜなら、ロボットが意味のない複雑な情報に惑わされずに、周囲の状況の自分にとっての意味を理解できるからである。これによってロボットは危険を避け、有用な目印を正確に選んで用いながら安全に効率良く行動できることになる。しかし、この記号表現は実世界でのロボットの行動を想定すると難しい。というのは、環境がロボットに及ぼす影響を適切に表現しなければ、ロボットにとってそれぞれ特有の意味を持つ様々な行動から一つを正しく選択することはできないからである。

本章では、ロボットと同様に自分で行動計画を立てる自律走行車にとっての環境と自分の関係の本質を、自律走行車自身に知らせることのできる言語、即ち記号表現の単位をどの様に与えるかを考える。

3.1 環境の定性表現

車庫入れ問題を解くためには、自律走行車が

1. 車庫に入るというゴール
 2. 壁との接触を避けるという制約
- の二点を満たす必要がある。そこで、車から見た環境空間をこの目的に即して分割し、分割された各区域を

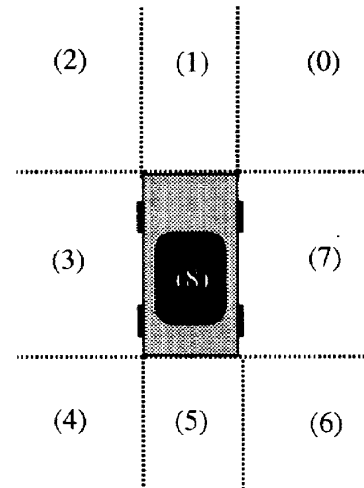


図3 環境の定性表現のための空間分割（上が車体の前部）

環境を表現する言語の基本単位とする。

ここでは、図3の様に空間を分割する。区域(0)から(8)のうち、どこに車庫の各角が含まれているかは先述の全方位視覚センサで得られる情報からわかるので、これらの角の位置の定性表現として環境の状態を表す。即ち、車庫の角 X が自動走行車にとっての領域 Y に属する状態を $X(Y)$ と書く。すると、先ず1. ゴール状態は「車庫の四つの角が自律走行車の右前方、左前方、右後方、左後方にそれぞれ位置する状態」、即ち図1(1)の車庫なら $P(2), R(4), S(0), U(6)$ と、図1(2)なら $P(4), R(6), S(2), U(0)$ と定義できる*2。

又、2. の接触回避については、自律走行車が実際に壁と接触してから接触したことを知るのでは遅すぎるから、ロボットの外郭と車庫の内壁の距離が一定値より小さくなった接触直前状態を検出するようにする。ここでは、先述の様に、視覚センサとして全方位視覚センサを用いることを仮定しているので、図2の影で示す様に、知覚された空間のうちで見かけ上自律走行車の占める区域がそのまま、車と地面の接触面と、その外郭から一定の幅の周辺までを含むことになる。即ち、「センサから見て、見かけ上自律走行車の占める区域に壁が入らない」、即ち三辺 PR, RU, US のいずれか一つでも図3の領域8の四辺のいずれかと接しているのが接触直前の状態となる。以上をまとめると、図3はゴール状態を十分に表現し、接触状態の表現には必要十分な空間分割ということになる。

3.2 自動走行車の移動の定性表現

3章の環境の定性表現に基づき、自律走行車の移動も、車体に対する環境の相対的な移動として定性表現

*2 車体後方からの入庫である。

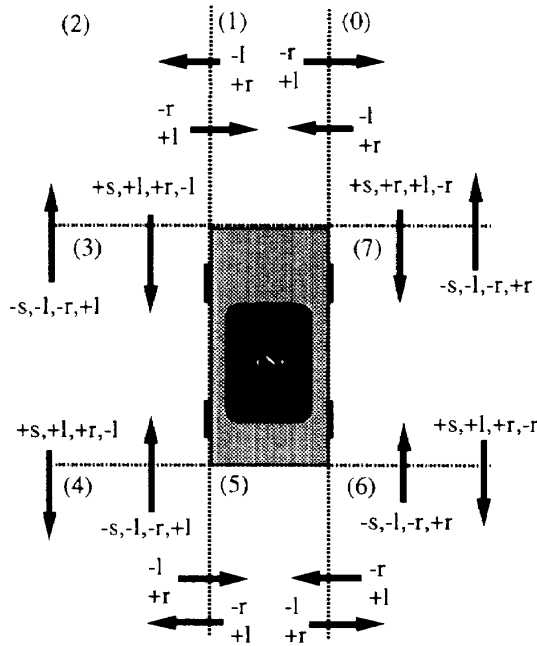


図4 6種類の行動による角(ランドマーク)のロボットに対する相対移動

する。ここでは、2章に述べた自律走行車の6通りの行動についてそれぞれ、図4の矢印の様に区域から区域へと目印の角を移動させることとして表現する。

3・3 定性表現の表現力の限界

前述の様に図3の空間分割はゴールと接触の状態は十分に表現しているが、車体の運動を考えると4・3節に後述する様に壁との想定外の接触の危険もある。

しかし、壁との接触を間違いなく避けるのに十分な程に環境を定性表現によって表しきめることは、本論文では目指さない。というのは、この様な想定外の壁との接触は環境の位置情報が不確定であること(1章の能力2参照)による避け難い結果だからである。この点については、次の4章において「適応行動」の位置付けとともに改めて述べることにする。

4. 定性推論を用いた行動計画

車庫の近くにさしかかると、自律走行車は先ず車庫入れのための行動の筋書きをたてる。この筋書きは、自律走行車から見た各角の相対的な位置を移動させるプランとして与えられる。次に、この筋書を基に実際に車庫入れ行動をとって、筋書にない状態(壁への接触)に達した場合は適応行動を選択しつつ車庫入れを達成して行く。4・1節と4・2節にこれらの処理の詳細を述べ、4・3節で適応行動が本研究においてどのように位置付けられるかを論じる。

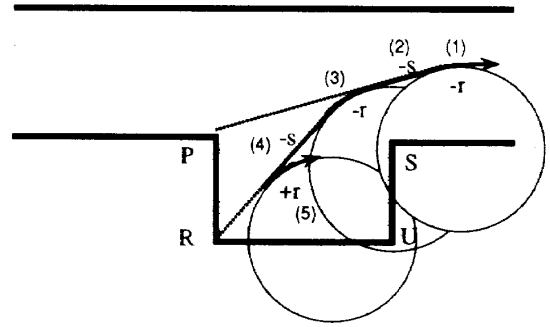


図5 自動走行車の入庫の筋書き

4・1 行動の筋書き

筋書きとは、「どの角がどこに見えたら、どの角を図3のどの区域からどの区域に移動させるか」という自律走行車の注視と行動のプランである。

筋書きは、入庫行動の開始前に初期状態とゴール状態から推論により自動生成される。この推論は、式(1)のホーン節の知識を最小個数だけ組み合わせて初期状態から目標状態までの経路を得るという手続きであり、得られた組合せが筋書きとなる*3。人が車を運転する場合と同様に、車庫の種類によって入庫後の自律走行車の車庫に対する配置は変わるし、その配置に到達するための行動も全く違うものになると予想される。

求める筋書きは、例えば図5の様なものである。図5は太線の車庫に対し、矢印を車体前方として後向きに入庫して行く行動の筋書きを、実線で表したものである。円弧は、ハンドルを切った場合の車体の回転の様子を表している。点線は図3の境界線である。図5は、1:先ず回転(-r)によってPが区域(6)から(4)に移動し、2:そのまま後退(-s)した後、今度は3:Rが区域(6)から(4)に移動(-r)し、4:後退(-s)して5:最後に回転(+r)によりSを区域(2)に収めるという筋書きとなっている。この筋書きを

- 1: $P(4) \leftarrow P(6), -r.$
- 2: $S(7) \leftarrow S(6), -s.$
- 3: $R(4) \leftarrow R(6), -r.$
- 4: $P(3) \leftarrow P(4), -s.$
- 5: $S(2) \leftarrow S(0), +r.$ (2)

の様に表記する。ここでP(6)は、角Pが区域(6)に含まれることを意味する。

自律走行車は、この筋書き通りに移動しているかど

*3 この最適化は仮説推論と等価でNP完全である[Bylander 91]が、ここでは走行前に一度筋書きを立てるだけなので大きな問題とはならない。

うかを知るために、各時点で筋書きで予測される状態を記述する角（上の 3:ならば角 R ）を注視し、その角の位置が筋書きから外れると次の適応行動を採る。

4・2 自動走行車の適応行動

ここでの適応行動とは、壁との筋書き外の接触から元の筋書きに戻ろうとする行為を指す。即ち、自律走行車が当初の筋書き通りには進めなくなった（思いのほか車庫が狭いなどの予想外れのせい）場合、センサ情報に適応しつつ筋書きにない行動を採ることを言う。この節では、適応行動の手続きを述べる。

〔1〕ゴールアトラクター

ゴールアトラクターでは、次の二つの基本方針を並列に用いて行動の優先度をつけ、各時点で最も優先度の高い行動を選択する。

● 制御用知識の適応的な利用 筋書き通りに移動していたのに予想と違う状態に陥った場合には、元の筋書きを適用できる状態にしなければその後の行動が採れなくなる。例えば、ある状態 A から筋書き中のルール $C \leftarrow A, Y$ に従って行動 Y を採ったにもかかわらず状態 C に到達しなかった場合、失敗直後の状態 D から改めて状態 C に達するためには、別のルール $C \leftarrow D, X$ を用いて行動 X を選択すると予定の状態 C が得られる。すると、その後は再び元の筋書きで行動できる。

ところが、状態 D と状態 C が制御用知識中の同じルールの前件と後件にそれぞれ出てくるとは限らない。そこで、制御用知識中の各ルール r について「現在の状態（四つの角がどの区域にあるかという組合せ）と r の前件の共通アトム」および「次のサブゴール（筋書きでは現在ある筈の状態）と r の後件の共通アトム」の個数に応じて、 r の前件の行動の優先度を倍加するようにする。これにより、多くの角が筋書き通りの位置に移動する行動を優先して選ぶ。即ち、元の筋書きの適用を続けられるようにするヒューリスティックを用いるのである。

● 履歴情報の利用 自律走行車は、自分の行動と経験した状態の履歴を保存しておく。そして、ある行動を採ることによって以前に経験したものと同一の状態に至ってしまった場合は、その行動の優先度を下げる。これによって、何度も同じ状態に戻る行動の冗長さを排し、ゴールへ向かう効率を一層向上させるのである。

以上のように決めた優先度の最も高い行動が一つだけ（例えば、ある角が図 4 の区域 (2) にある場合は、 $+s, +l, +r, -l$ の 4 通りの行動から一つ）選択される。

〔2〕接触予防

ゴールアトラクターで用いたものと同じ履歴から、

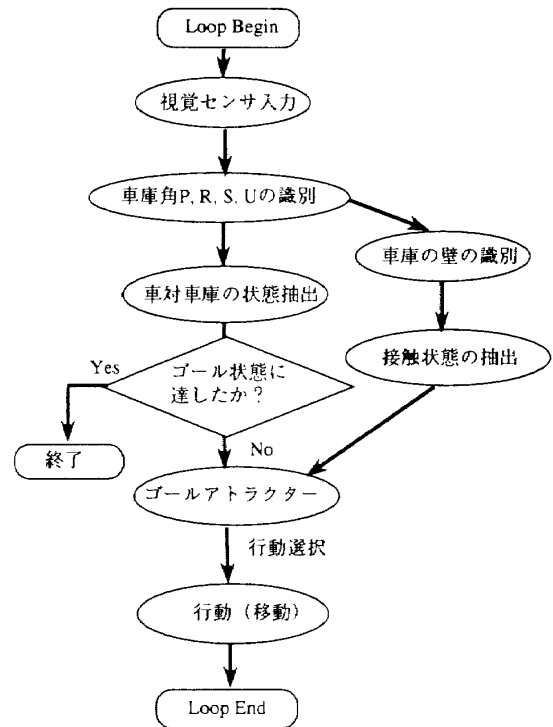


図 6 適応的行動の手順（フローチャート）

過去に壁と接触した直前の行動の優先順位を下げることにより、接触を予防する。

以上の処理の流れをフローチャートで表すと、図 6 の通りになる。

4・3 適応行動の位置付け

適応行動は、壁への接触直前まで車体が行ってしまうというエラーによって始動されるが、この接触には以下のような可能性がある。

- ・ 車体が左右に曲がって行くと、車体の前後方向の境界（領域 (1) と (2) の境界など）の近くにある車庫の角に接触することがある。
- ・ 車体から車庫の角までの距離が近い場合も接触の危険がある。例えば図 7 で、車体左後ろの (4) の領域にあった角 S を領域 (6) に入れるつもりで左折後進しても、角 S が車体に非常に接近していた場合は、角 S に車体が接触した $S(8)$ の状態に至ることがある。

これらはいずれも、車体と車庫との相対的な位置関係が、車体の（0でない半径を持つ）回転によってどれほど危険であるかが分からなかったことによる接触である。そしてそれが分からなかったのは、われわれの定性表現には環境の位置についての数値情報が含まれていないからであるが、その元を正せば環境の位置情報が本来不確定であることが原因であった（1・2 参照）。

この環境の位置の不確定さのせいで、壁と車がいつ

接触するかは事前に正確には予知できない。そこで正確な接触予知は行わず、接触直前の位置まで実際に移動することによって接触直前状態 ($S(8)$ など) を検出し、検出した時点から筋書に戻るべく行動するのが適応行動である。

適応行動が多くなると車庫入れが遅くなるのは明らかであろう。とはいえ、位置情報の不確定さという本質的な問題が元で自律走行車が適応行動を採ることを考えると、定性表現の仕方をどう変えても、やはり筋書だけでゴールの達成することの保証はできないことになる。

しかし、適応行動の頻度を定性表現の仕方によって減らす余地はある。3・1節で、車体に平行な境界線で環境を分割したのはこの為である。というのは、入庫前の車体の後進運動は、車体後端が車体側面に対して左右どちらかに小さな角度（一定のハンドル角30度に対し、実際の自動車と同じ約12度となる）で、又は平行に後進するので近似的に前進か後進となるから、その動きで壁に接触するかどうか事前に判断することは、車体側面に平行な線で環境を分割すればほぼ可能だからである。尚、入庫完了直前のハンドルの切り返しなどでは車が前進することもあり、その場合は車体側面に対して大きな角度で車の進行方向の先端（前端）が進むことになるが、切り返し時は殆んど適応行動だけとなっているから、筋書きからそれたことを正しく判断することの意味は小さくなっている^{*4}。

5. シミュレーション実験と結果の評価

5・1 シミュレーション実験の設定

車庫として、図1の様に(1)縦型(1b)斜め(2)横型の3種類の車庫を設定し、前章までに述べた定性推論による行動決定を用いた車庫入れをシミュレーションによって試行した。縦型、斜めの車庫は幅を3mから5m、深さを6mから10mまで変化させ、横型では深さを3mから5m、幅を6mから10mまで変化させた。自動走行車の出発点は入口の辺 PS から距離20m以内のランダムな点とし（通常、これ以上遠くからは入庫行動をとらないため）、出発点における移動方向は壁に平行な ($P \rightarrow S$) 向きから45度以内とする。自律走行車は、長さ4.6m、幅1.6mの乗用車サイズとし、入庫行動の前に車庫が縦型、斜め、横型のいずれの

*4 車体の動きと共に空間分割を変化させる方法も考えられるかも知れない。しかし、あらゆる境界線に対して式(1)の様な知識を用意し、動きが変わる度に後の行動の筋書きを改めるのは、知識の規模と計算量の両面で現実性を欠くことになる。

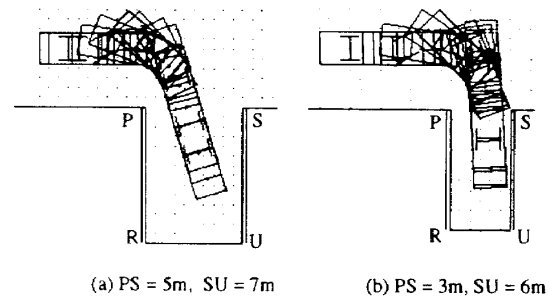


図7 縦型車庫への車庫入れ

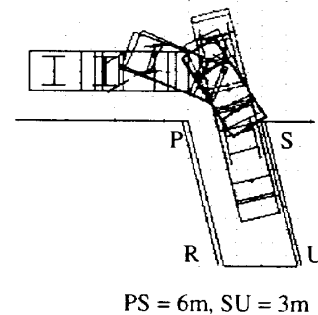


図8 斜め車庫への車庫入れ

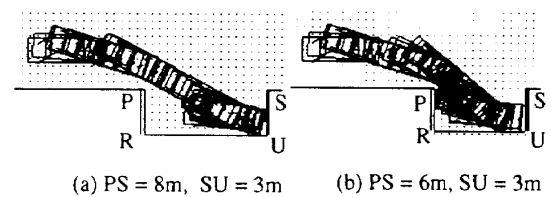


図9 横型車庫への車庫入れ

種類であるかだけは認識できるが、正確な大きさについては知らずに近づいてくる。人が運転する場合も経験することであるが、車庫の種類は一見して分かっても、車体に対して車庫がどの位余裕のある大きさを持つかは、実際に車庫に入ってハンドルを切ったり近くで見たりしなければ判断できないものである。

縦型と斜めの車庫では車体側面を車庫の両脇の壁に沿わせて車庫に進入すればよいが、横型ではこれらとは丁度90度向きの違う車体がゴール状態となる。横型の場合は何度か前後に動くことによって車体の位置を微調整しなければならず、縦型や斜めとは全く異なる行動を採る必要が生じることが多い。更に、同じ種類の車庫でも、幅が違うだけで自律走行車は微妙な判断によって全く別の行動計画を立てなければならないことがある。いわば、狭い車庫ではそれだけ器用に振舞わなければならないのである。

この様に、車庫の概形は知っていても正確な大きさを知らないとき、その場で正確に判断して車庫入れが

できるかどうか、この実験で評価したい点である。

5・2 実験結果とその評価

図7は、縦型の車庫に車体後部から車庫入れする場合である。(a)と(b)の違いは、車庫の幅の違いである。(a)の様に車庫が広ければ、車は一度も前進せずに後進のみで車庫に入ることができる。一方、(b)の様に狭い車庫に入庫する場合は一度角 S に接触直前まで接近し、一旦前進して車を車庫の角度(即ち、壁 SP に対して90度)に合わせてから入庫しなければならない。これらの場合を本手法によって正しく区別し、適切に行動を計画して車庫入れに成功した。この他にも、シミュレーション実験を行った全ての縦型の車庫について、不必要な運動は全くせずに車庫入れができた。

次に、図8は斜め車庫への入庫の様子である。この場合、縦型の場合と同じく、車体にとっては両横の壁に当たらずに進入することが注意すべきこととなるので、行動計画も定性的な(即ち、3章の言語での)表現は縦型と全く同じものとなった。

最後に図9は、横型の車庫の場合である。横型車庫への入庫は、縦型の場合よりも難しい。というのは、奥の壁(RU)までの車の距離を調節する場合、移動しやすい前方向ではなく横方向に車体を移動しなければならないからである($+l, +r, +s, -l, -r, -s$ の6通りの行動のうち、自律走行車がどれか一つの行動によってすぐ横の区域(図3の区域(3)や(7))に移動することはできない)。やはり、(a)と(b)の違いは車庫の幅の違いである。この場合も縦型車庫と同様に、(a)の様に車庫が広ければ、車は一度も前進せずに車庫に入ることができた。一方、(b)の様に車庫が狭い場合、何度も前進と後進を繰り返して入庫に成功した。

5・3 考 察

本手法によって、車体は様々な車庫に対して適切な手順で入庫に成功した。又、結果である移動の履歴を全て保存した(図7(b)の場合を図10に示す)が、車庫の種類(縦型か斜めか横型か)と広さによって履歴の定性表現は全く異なるものとなった。即ち、行動の定性的な意味が大きく分かれたことになる。この結果は、車庫の大きさと形が自律走行車にとって持つ定性的な意味を正しく把握し、行動計画に使っていることによる。環境を連続値情報として扱わず、環境と車の関係をベースにした言語を用いた定性表現によって捉えた結果である。

更に、同じ種類の車庫への入庫では全く同じ筋書きを得るにもかかわらず、図7、図9の各(a)と(b)の様

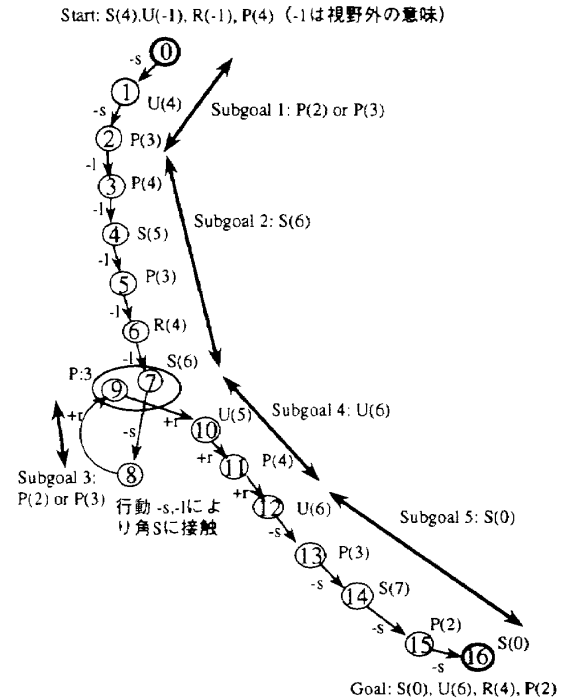


図10 車庫入れ行動における行動履歴(丸いノードが各時点、その横がその時点で経由した状態を表し、subgoalが筋書き中の途中状態を表す)

に車庫の大きさの違いによって定性的に異なる行動となった。このことは、適応行動によって、車庫の大きさに合う行動が選ばれている例として評価できる。又、もし環境の位置情報を連続値のセンサ入力とし、その値に従って連続的に行動を変えるような行動決定を行うのであれば、車庫幅の些少の変化に対して自律走行車がこの様に全く意味の異なる行動をとることはなかった筈である。

最後に、興味深いことに、得られた行動履歴は人間の運転者が車を車庫に入れる場合のハンドルの切り方によく一致した。まず、横型車庫への入庫で切り返し行動(図9(b))をとる車庫の狭さ、切り返しの回数は人間の場合と一致した。又、ロボットの注視点(各時点で状態を記述する車庫の角)も適切に選択されていった。例えば、図10におけるノード8は図7(b)の自動走行車が角 S に接触した時点であるが、この時は次に左にハンドルを切るために角 P に注視点を移している。

移動速度を一定とし、微妙なハンドルさばきは2章のロボットの行動として与えていないので、スピードとハンドルを切る速さの兼ね合いなどは人間と比較できないが、運動性能が高いとは言えない自律走行車なりに人間と共通する移動計画が相当可能であることは示せたと考えている。

本手法の様に環境を単純に区域に切り分け(3章)、簡単な戦略で行動決定を行う(4章)だけで、人間と

共通する行動計画を得たのは興味深い。筆者らはこの結果を、人間も又乗用車のボディの大きさと形状に応じて空間を切り分けるためと解釈している。「車両感覚を掴む」ことが運転上達のポイントであると言われるが、これは車両と環境の関係を感覚として学習することであろう。上記の結果は、「車両感覚」において、車体を中心とした環境表現を運転者が獲得することが重要な位置を占めているとすれば理解できる。

6. 結 論

小回りのきかない物を狭い場所で移動させる制御として代表的な自動走行車の車庫入れを、環境の位置情報が不確定でも実現するという問題を扱った。

位置情報の不確定さに対しては、環境の定性表現によって対応した。自動走行車は、この定性表現に基づいて各時点での車体の移動の意味を知らながら動くことにより壁との接触をさけながら入庫する。しかし、定性表現ではセンサの数値情報を捨てる為、壁といつ接触するかを事前に完全に予知できない。そこで、接触を予知するのではなく、実際に接触直前まで動いて、接触直前状態を検出したら適応行動に出るという戦略を取り入れた。本論文では、以上の手法の有効性を実験的に示した。

次の課題としてわれわれは、意外な状態に陥った場合に環境の重要な部分だけ分割の詳細化を行うなど、環境の表現能力の動的な変化の実現を考えている。又、実環境においても本手法による自律走行車の行動計画を実現する予定である。

謝 辞

査読者のコメントが論旨を明瞭にする上で非常に適切であったことを記し、感謝します。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Bylander 91] Bylander, T., Allemang, D., et al., The Computational Complexity of Abduction, *Artif. Intell.*, Vol.49, pp.25-60 (1991)
- [Caines 95] Caines, P.E. and Wang, S., CO-COLOG: A Conditional Observer and Controller Logic for Finite Machines, *SIAM J. Control* (1995)
- [Dean 90] Dean, T.L., Wellman, M.P., Planning and Control, Morgan Kaufman (1991)
- [Fikes 71] Fikes, R.E. and Nilsson, N.J., STRIPS: A New Approach to the Application of Theorem Proving to Problem Solving, *Artif. Intell.*, Vol.2, pp.189-208 (1971)
- [Fraichard 93] Fraichard, T. and Laugier, C., Dynamic Trajectory Planning, Path-Velocity Decomposition and Adjacent Paths, *Proc. of the 13th Int'l Joint Conf. on Artificial Intelligence*, pp.1592-1597 (1993)
- [Gorinevsky 96] Gorinevsky, D., et al., Neural Network Architecture for Trajectory Generation and Control of Automated Car Parking, *IEEE Transactions on Control, Systems Technology*, Vol.4, No.1 (1996)
- [Latombe 91] Latombe, J.C., Robot Motion Planning, pp.403-451, Kluwer Academic Publishers (1991)
- [Levitt 90] Levitt, T.S. and Lawton, D.T., Qualitative Navigation for Mobile Robots, *Artif. Intell.*, Vol.44, pp.305-360 (1990)
- [Poole 95] Poole, D., Logic Programming for Robot Control, *Proc. 14th Int'l. Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI'95)*, pp.150-157 (1995)
- [Sandewall 89] Sandewall, E., Combining Logic and Differential Equations for Describing Real-World Systems, *Proc. 1st Int'l Conf. Principles of Knowledge Representation and Reasoning*, pp.412-420 (1989)
- [鈴木 93] 鈴木他: モデルに基づく運転操作プランの生成機構を組み込んだプラント運転制御用エキスパートシステム, 人工知能学会誌, Vol.8, 439-447 (1993)
- [山本 94] 山本元司, 小林正明, 毛利彰, ファジィニューラルネットワークによる四輪自動車型移動ロボットの車庫入れ動作の計画と制御, 第12回ロボット学会学術講演会 (1994)
- [Yamazawa 95] Yamazawa, K., Yagi, Y., and Yachida, M., Obstacle Detection with Omni-directional Image Sensor HyperOmni Vision, *Proc. Int'l Conf. on Robotics and Automation* (1995)

[担当委員: 白井良明]

著 者 紹 介

魏 世杰



1988年台湾大学電機工学科卒業。1990年台湾清华大学大学院情報研究科修士課程修了。現在、大阪大学大学院基礎工学研究科システム工学専攻博士後期課程在学中。定性推論とロボティックスの研究に従事。日本ロボット学会学生会員。

(seke@sys.es.osaka-u.ac.jp)

大澤 幸生(正会員)は、前掲 (Vol.13, No.3, p.423) 参照。

八木 康史



1983年大阪大学基礎工学部制御卒業。1985年同大学大学院修士課程修了。同年三菱電機(株)入社。同社産業システム研究所にてロボットビジョンの研究に従事。1990年大阪大学基礎工学部情報工学科助手。同学部システム学科講師を経て、1996年助教授。1995~96年オックスフォード大学客員研究員。1996年度電子情報通信学会論文賞。IEEE, 情報処理学会, システム制御情報学会, 日本ロボット学会など各会員。工学博士。

(y-yagi@sys.es.osaka-u.ac.jp)

谷内田 正彦(正会員)は、前掲 (Vol.13, No.3, p.423) 参照。