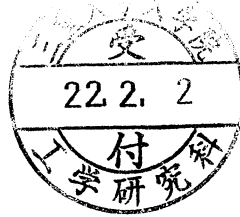


修士論文

移動ロボットの自律遠隔融合制御 に関する研究



指導教員 加藤 典彦 准教授

平成 21 年度

三重大学 大学院 工学研究科 博士前期課程
機械工学専攻 メカトロニクス研究室

408M120

高木 薫

目次

第1章 緒言	1
第2章 実験機	2
2.1 システム構成	3
2.1 移動ロボット	4
2.2 web カメラ	4
2.3 カメラ角・ステアリング角・車体角	5
2.4 ジョイスティック	6
第3章 自律遠隔融合制御	7
3.1 手動操作	7
3.1.1 予備実験	9
3.1.2 実験結果	10
3.2 自動操作	10
3.3 融合制御	11
3.4 カメラ操作の補助	12
第4章 実験	20
4.1 実験方法	20
4.2 実験結果	20
4.3 t 検定	21
第5章 結言	23
謝辞	24
参考文献	25

第1章 緒言

遠隔操作ロボットは、災害現場や原子力施設など人が直接立ち入ることが危険な環境下での作業に有用であり、さまざまな場面において活躍している。

遠隔操作で作業を行う上では、遠隔操作ロボットの状態や周囲の環境を、オペレータが把握することが不可欠である。オペレータへの情報伝達の手法については、映像など視覚を利用するもの[1][2][3][4]、フォースフィードバックなど力覚を利用するもの[5][6]、アラームなどの聴覚を利用するものなどがある[2]。その中で視覚の利用は、他の手法に比べ多くの情報をオペレータに伝達できる。操作に適した視覚情報の提供が可能となれば、オペレータは短時間で正確な作業環境の把握が可能となり、作業効率や正確性の向上が期待できる。そのため、遠隔操作において視覚を用いて情報伝達を行う手法の研究が求められている。視覚イメージによる映像情報を用いて作業を行う場合には、提示される映像はオペレータが必要とする映像設定(アングル、ズーム倍率など)であることが重要であり、作業に最適な映像を提示する手法について研究がなされている。しかし、一般的には遠隔操作における映像設定は、手動で行われているのが現状である。また多数のカメラを用いて映像を提示する手法においても、カメラの切り替えが必要となる。そのため、この映像設定操作はオペレータにとって本来のロボット操作以外の余計な作業となっている[1][3]。

また、移動ロボットの制御手法には、自律移動型と手動操作型がある。自律移動型ロボットは、環境地図などのあらかじめ与えられた情報に基づき、内・外界センサから逐次的に得られる情報を処理して、行動を決定・修正しながら移動する。しかし利用できるセンサの種類や能力の限界から、想定外の状況や激しく変化する環境には対応できない。手動操作型ロボットは、人間の判断能力を利用できるのでフレキシビリティが高い。しかしロボットが計測できる、限られた情報に基づいて、人間は環境・状況を判断しなければならず、判断や操作のミスがロボットの事故(衝突など)に直接つながってしまう[7][8]。融合制御は、両者の長所を効果的に取り入れてそれぞれの欠点を補うものであり、ネットワーク遠隔操作ロボット・システムの実現には不可欠な技術だと考える。移動ロボットにおいては、操作者による手動操作とロボットのローカルな判断による自律動作を融合する制御手法として、さまざまな研究がされている[9][10]。センサの性能が上昇するに従い自動操作で走行を行える範囲は拡大するが、センサには限界があり災害現場等の危険な場所への対応が全て行えるわけではないため、操作者の介入は常に必要であると考えられる。

本研究では、カメラを使用して危険な環境下の探索・走行を行う移動ロボットを、操作者が安全かつ容易に操作することを目指し、手動操作と自動操作の長所を効果的に取り入れる手法を提案する。提案手法では、障害物や探索物をロボットがセンサで探知できない状況下での使用を想定し、自動操作を操作者が簡単な操作で補助することと、カメラ操作の補助を行うことで高い操作性を得ることを目的とする。すなわち、自動操作で予め判明している基本的な状況に対応した走行を行い、操作者がカメラセンサから得た情報に応じて適切な対応をとることで、人間の高い判断能力を生かすことができると考えられる。

第2章 実験機

オペレータ側 PC に接続したジョイスティックにより移動ロボットを操作する。移動ロボットにはパン・チルト機構を内蔵した Web カメラを搭載し、画像をオペレータ側 PC に転送する。概観を Fig.2.1, Fig.2.2 に示す。

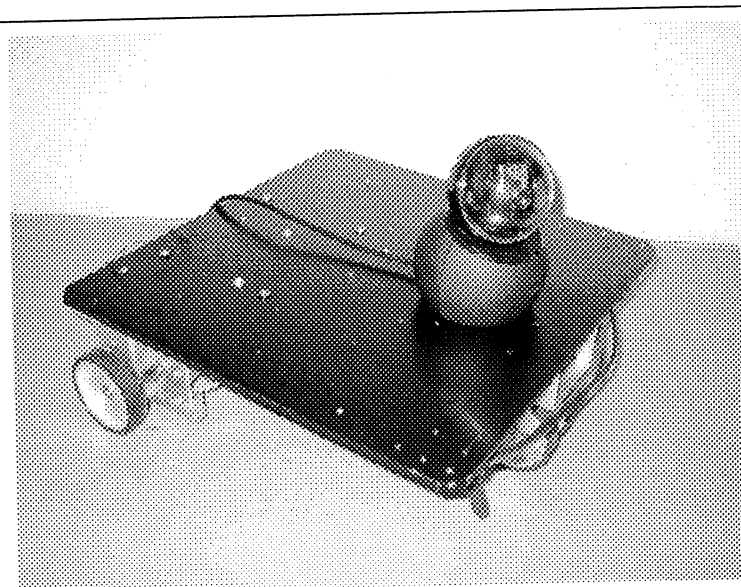


Fig.2.1 移動ロボット

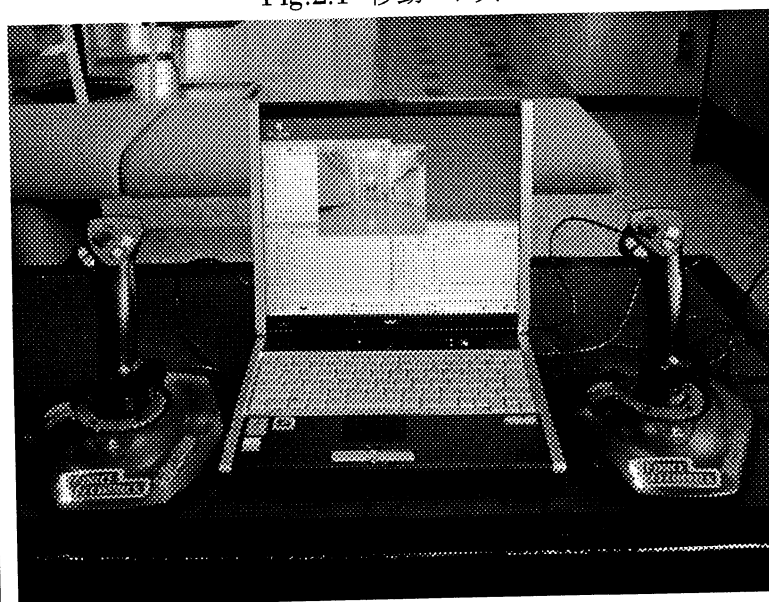


Fig.2.2 オペレータ側PC

2.1 システム構成

システムの構成を Fig.2.3 に示す. 操作者は主にカメラの映像をたよりに, ジョイスティックを操作して移動ロボットとカメラを操作する. コンピュータ同士は有線ランによって接続されている. 実験装置の仕様・詳細については次節以降で述べる.

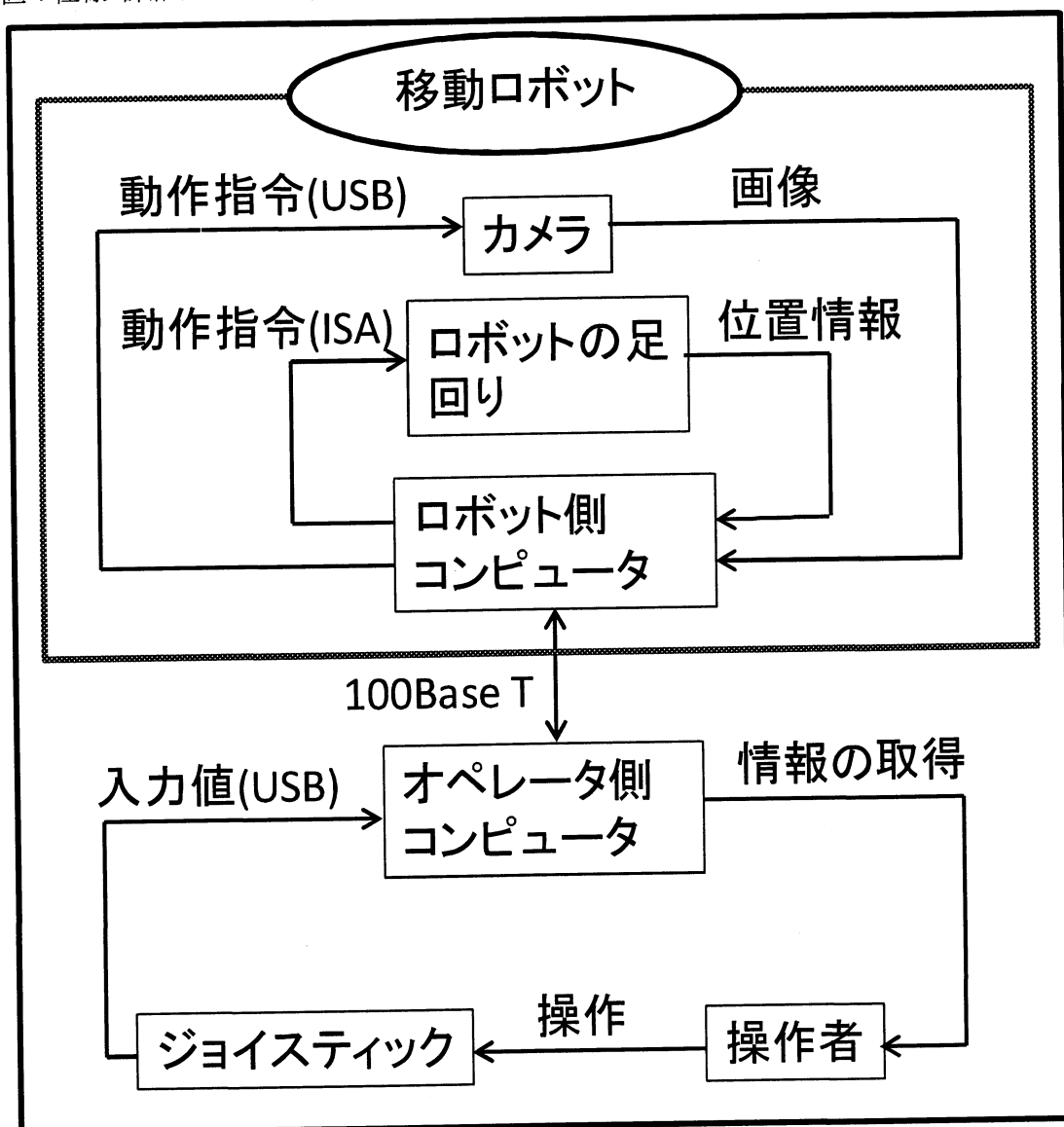


Fig.2.3 実験システム構成

2.2 移動ロボット

移動ロボットには日本システムデザイン社製 Plat-F1を用いる。標準搭載の CPU では処理能力不足のため、Pentium M に換装している。主要諸元を Table 2.1 に示す。

Table 2.1 Plat-F1 諸元

CPU	Pentium M 600MHz
走行方式	動輪 2 個, ステアリング輪 1 個の 3 輪方式
動輪	DC モータ 2 個, ロータリエンコーダによるフィードバック制御
ロータリエンコーダ分解能	0.2 mm/pulse (4 通倍)
ステアリング輪	DC モータ, ポテンショメータによるフィードバック制御
ユニバーサルプロセッサ	日立 HD63140 Universal Pulse Processor 入力電圧 0~5 V
A/D コンバータ	10ch の 10bit 逐次比較型 A/D コンバータ
外形寸法	W 300 mm × D 300 mm × H 100mm
最高走行速度	2000mm/s
重量	約 3kg

2.3 Web カメラ

Logitech 社製 QVR-1 を用いる。メカニカルパン・チルト機構が内蔵されており上下左右に回転できる。主要諸元を Table 2.2 に示す。

Table 2.2 QVR-1 諸元

製品名	Q cam Orbit
型番	QVR-1
本体サイズ	84×84×111
フォーカス	固定フォーカス 16cm~∞
映像素子	130万画素CCDセンサ
有効画素数	640 × 480(動画)
フレームレート	最大 30 フレーム/秒
接続	USB
稼動範囲	縦方向 54°, 横方向 128°

回転速度については明記されていない。また回転角が大きくなると、回転角の原点がずれてしまう場合がある。そのため今回の実験では制御プログラムにおいて、回転速度を $36[^\circ/\text{s}]$ 、可動範囲を横方向 90° に制限している。

2.4 カメラ角・ステアリング角・車体角

移動ロボットの制御に必要な各角度を説明する(Fig.2.4).

α : カメラ角

正面を向いているときを 0 とし, 反時計回りを正とする.

Φ : ステアリング角

同じく正面を向いているときを 0 とし, 反時計回りを正とする.

γ : 車体角

初期位置における車体角を 0 とし, 反時計回りを正とする.

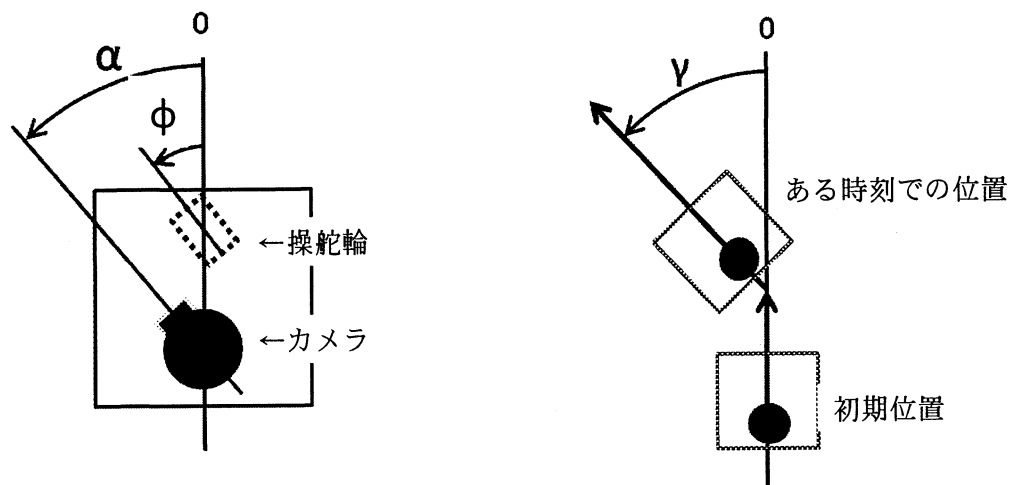


Fig.2.4 カメラ角・ステアリング角・車体角

2.5 ジョイスティック

Logitech 社製 WingManForce3D を使用する.

操作方法の説明

操縦時の走行の様子も加えて以下で説明する. 図はジョイスティックを上から見た様子である.

2 つのジョイスティックを使用し, 片方で車体を操縦, もう一方でカメラの向きを独立して操作する.
(Fig.2.5~6).

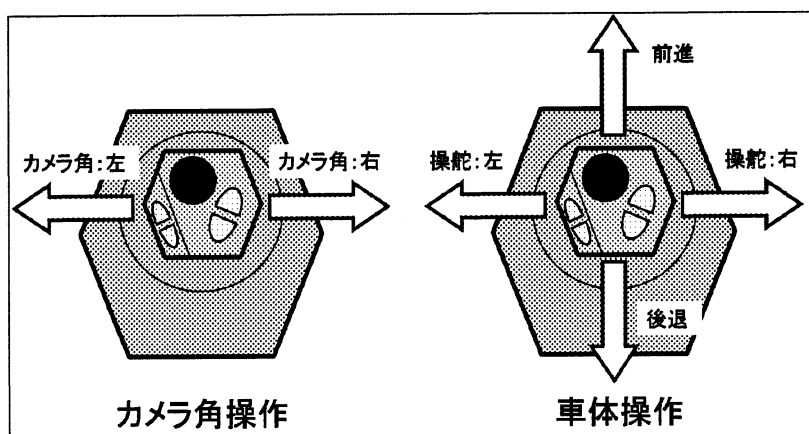


Fig.2.5 ジョイスティック操作

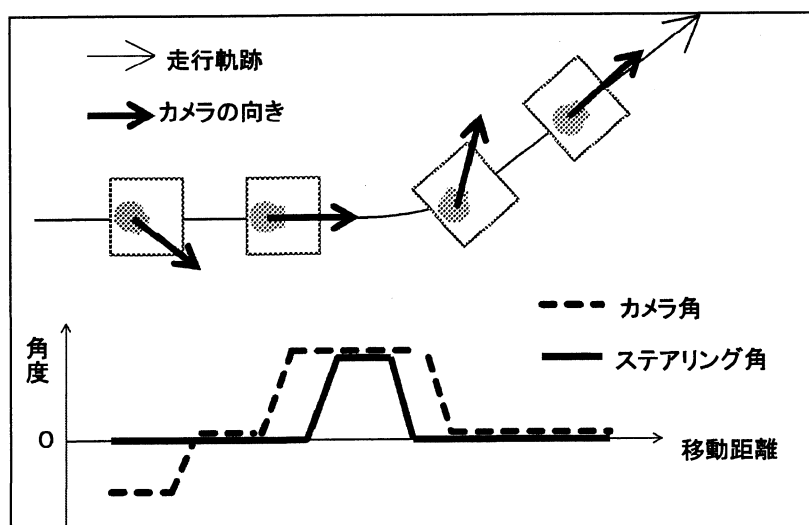


Fig.2.6 走行の様子

第3章 自律遠隔融合制御

3 章では実験に用いる移動ロボットの遠隔操作手法を説明する。本研究で用いる手法はロボットのセンサがカメラのみであることを前提とする。

3.1 手動操作

第 2 章で示したジョイスティックを用いて車体操作とカメラ操作を行う。走行は操作者に大きく依存すると思われる。操作者への負担軽減として、操作に用いるジョイスティックの本数を減らすことを考える。車体操作とカメラ操作を 2 本のジョイスティックで行うことと、1 本のジョイスティックで行うことの比較を、後述の 3 つの手法を用いて行う。

手法 1 : Fig.2.4,5 のように車体操作とカメラ操作を 2 本のジョイスティックを用いて走行を行う。

手法 2 : Fig.3.1 に示すように 1 つのジョイスティックを使用し、車体の操作にカメラを連動させる手法である。カメラ角は、カメラの首振りの限界値までは、ステアリング角と等しく操作される。車体とカメラの操作を独立して行うことはできないが、車体を停止してカメラだけを動かすことは可能である。

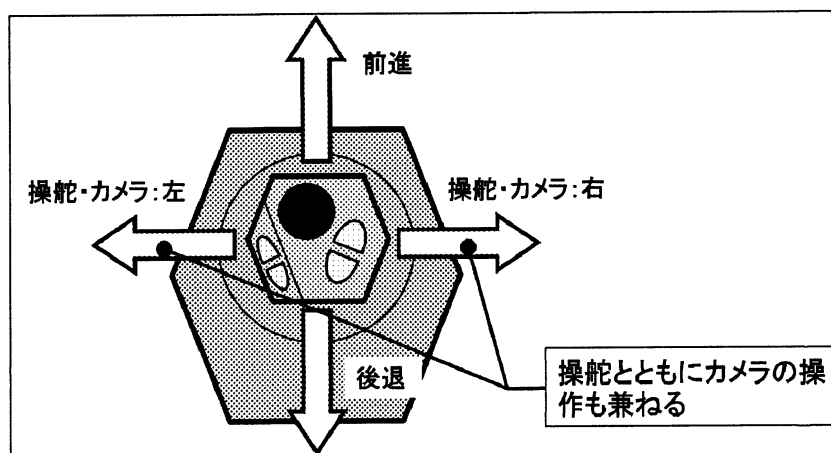


Fig.3.1 手法 2 のジョイスティック操作

左折時における車体・カメラの動きと、そのときのカメラ角・ステアリング角の関係を Fig.3.2 に示す。この手法ではカメラとステアリングが完全に連動するので、カメラ角・ステアリング角は下のグラフのように重なった形(図では見やすいよう少しずらしてある)となる。

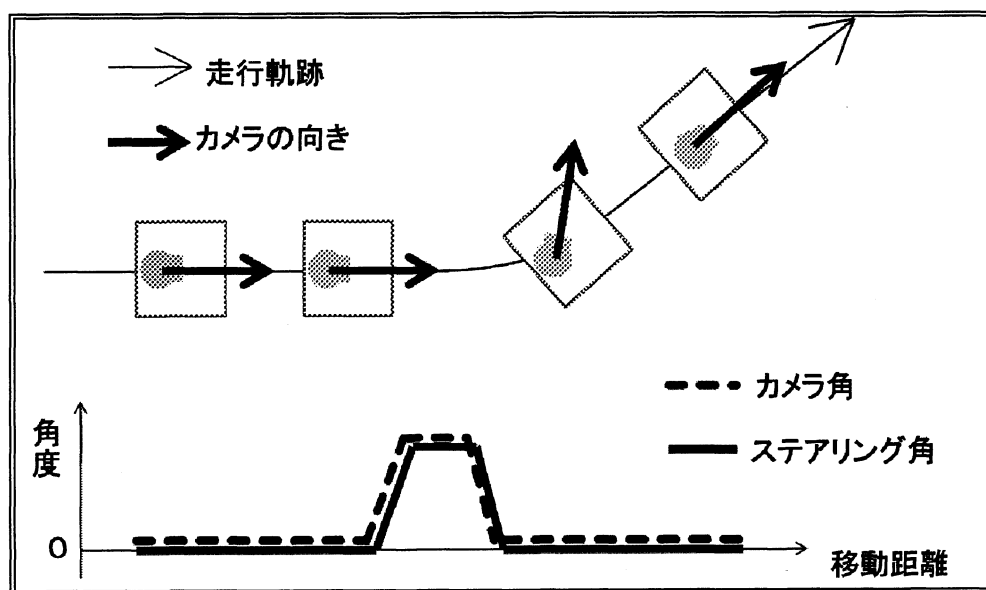


Fig.3.2 手法 2 における走行の様子

手法 3 :

手法 2 を元に Fig.3.3 に示すように 1 つのジョイスティックを使用し、ジョイスティック上部のボタンを押すことで操舵開始のタイミングを任意で指定できるようにした。左折時における走行の様子を Fig.3.4 に示す。これにより、障害物を注視しつつ曲がるという動作が非常に容易になると考えられる。

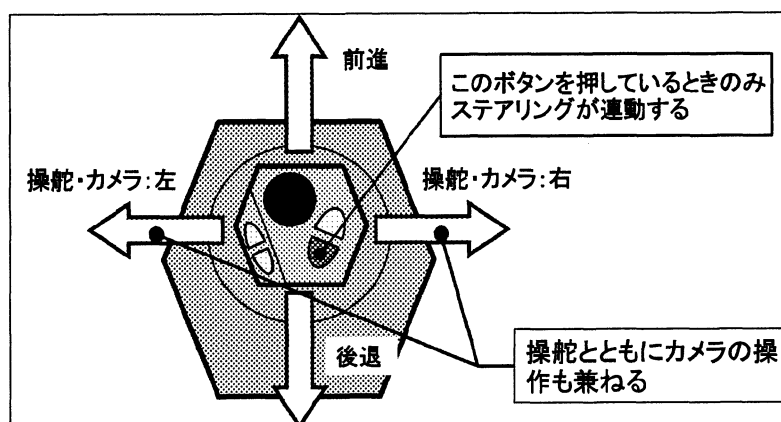


Fig.3.3 手法 3 のジョイスティック操作

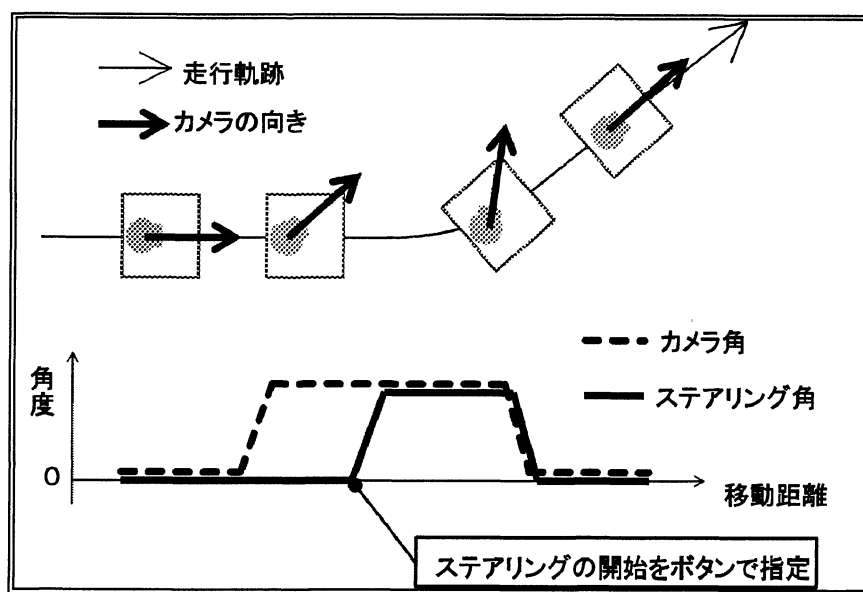


Fig.3.4 手法 3 における走行の様子

3.1.1 予備実験

予備実験として, Fig.3.5 のような障害物のない単純なコースで前述の 3 つの手法を用いて走行実験を行った. 被験者は各手法につき 20 回走行する. 実験を行う過程での習熟を考慮し, 20 回の走行のうちの 10 回はコースを逆走して走行する. 被験者は, コースの予備走行を行っておりコースの形状を事前に把握していることと, 他のコースでの練習により操作に習熟することの 2 つを満たした 20 代男性 3 人で行った.

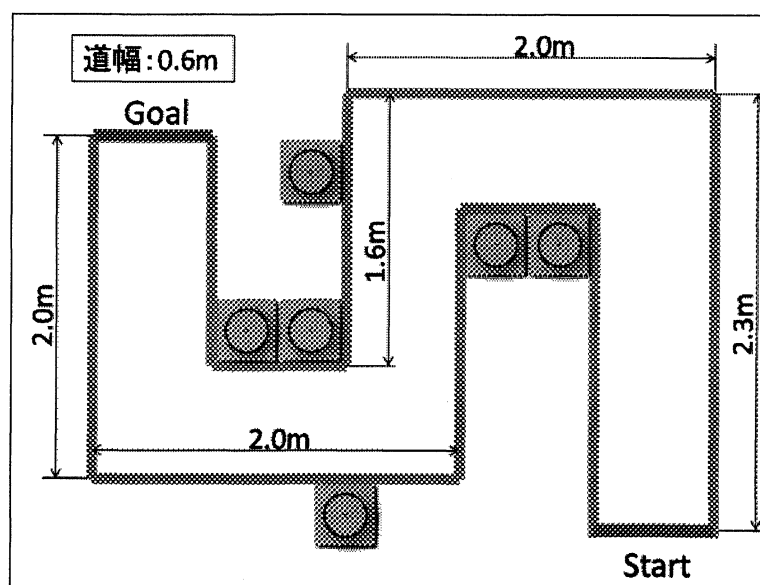


Fig.3.5 予備実験コース

3.1.2 予備実験結果

実験結果を Table 3.1 に示す．3 つの手法の全てにおいて，複数の衝突が確認されており，手動操作では予測可能なコースにおいてもミスが発生しやすいことがわかる．

Table 3.1 予備実験衝突回数

	被験者 A	被験者 B	被験者 C	合計
手法 1	10	11	8	29
手法 2	12	21	10	43
手法 3	2	6	8	17

3.2 自動操作

与えられた出発地，目的地および地図情報から，深さ優先探索を用いて生成した最短経路に基づいて走行を行う．本研究で用いる移動ロボットは，3 輪ロボットであるため旋回時には円弧状に経路を補正した．事前の地図情報と実際の状況に違いがなければ，手動操作と比較して安全かつ確実な走行が期待できる．また，事前の地図情報にない障害物を回避するためには，ロボットがセンサで障害物を認知する必要がある．本研究で用いるロボットはセンサがカメラのみであることから，例えば，カメラの映像から画像処理によって障害物の大きさを正確に判断する等しなければならない．画像処理は事前に処理を行う対象を絞らなくてはならないため，形状や動きが想定と異なる場合では対処できない．

Fig.3.6 と式(3.1)のように経路上の進行方向に合わせて走行を行う．

$$\varphi = K * \theta \quad (3.1)$$

Kは係数である．

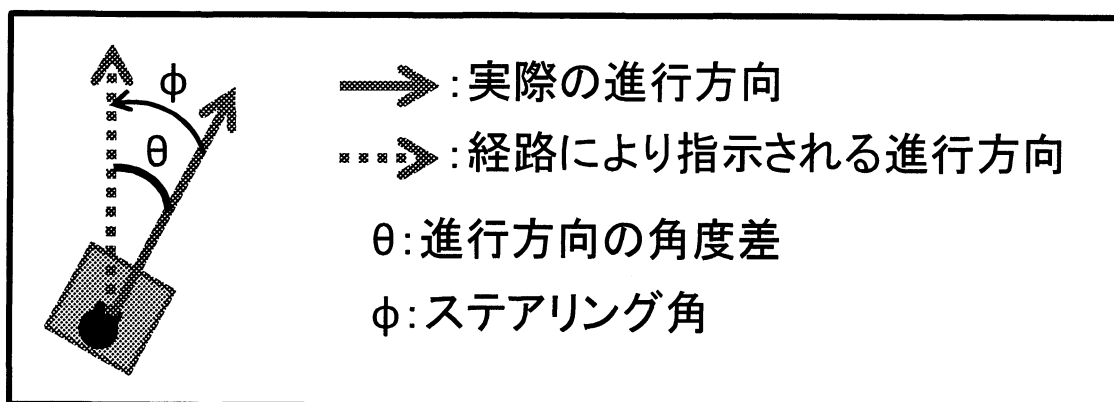


Fig.3.6 自動操作におけるステアリング操作

3.3 融合制御

3.1 節の手動操作におけるコースの形状を把握している状況で生じる操作のミスと、3.2 節の自動操作における障害物回避等の事前の地図情報と実際の状況に違いがあった場合の対処の不備を解決する手法を考える。自動操作の走行から手動操作で状況に応じた介入を行う手法を提案する。

提案手法では、Fig.3.7 のように、自動操作で走行中に操作者が障害物を確認（左から 2 番目の状態）したら回避行動をとる（左から 3 番目の状態）等、センサからの情報に応じて適切な介入を行う。自動操作における想定外の状況や激しく変化する環境には対処できない問題点を解決し、操作量を少なくすることで、手動操作に多く見られる操作ミスを減らすことができると考えられる。

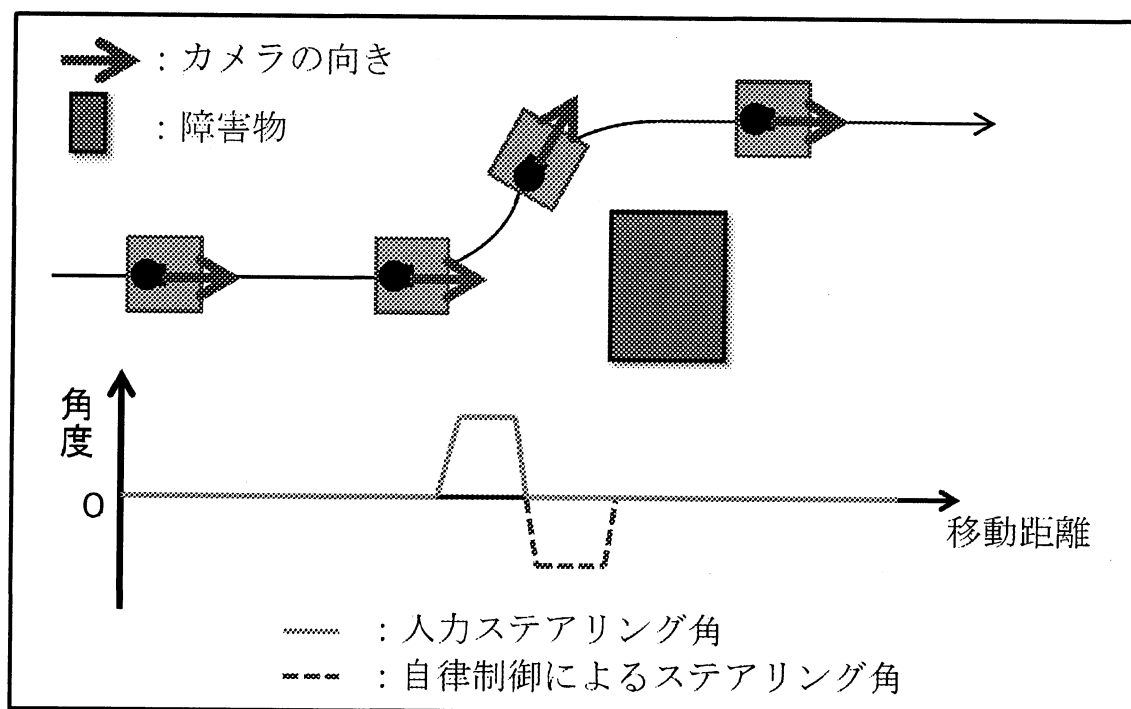


Fig.3.7 融合制御における障害物回避の様子

3.4 カメラ操作の補助

3.4.1 予備実験

カメラ操作の補助を行うため、Fig.3.8 のコースを用いて、3.1 節の手法 1（手法 α とする）と 3.3 節の融合制御（手法 β とする）を用いて人間の操作例を調べる。コース幅は 0.8 m で、コース内には操作者には事前に位置のわからない障害物と探索物が設置してある。探索物にはそれぞれ異なった数字が書かれており、操作者がカメラからの情報によって数字を認知することで、対称の探索物が探索できたとする。被験者は事前に他のコースで練習し操作に習熟している。予備実験の操作例から走行にどのようなカメラ操作の補助が有効かを考察する。

3.4.2 考察

Fig.3.9,3.10 では走行時に接触がなく探索もうまく行えている操作例を示す。Fig.3.9.b と 3.10.b のステアリング操作例を比較すると、手法 β では大きく操作量が減っていることが確認でき、操作者の負担を減らせていると考えられる。カメラの操作傾向として、 $A_1 \sim A_3$ 地点のコースに沿った旋回時では、移動ロボットが旋回する少し手前から、旋回方向にカメラを向ける傾向が確認できる。 $B_1 \sim B_5$ 地点の障害物回避では、カメラで障害物を捉えようとする傾向が確認できる。特に手法 β では回避行動と反対側にカメラを向ける傾向が確認できる。その他のカメラの動きは、探索に使われていると考えられる。しかし、探索物の位置によって操作が変わるため、大きな傾向は見いだせなかった。

Fig.3.11 では走行時に接触があった操作例を示す。接触のあった $C_1 \sim C_2$ 地点では、Fig.3.11.b, c から近くの探索物の方向、障害物とは逆にカメラを操作して走行を行ったタイミングで接触が発生している。走行中に走行に適さない形でカメラが動くことは、接触のリスクを高めているといえる。

3.4.3 カメラ操作の補助

Fig.3.9~3.11 の操作傾向からカメラ操作の補助として次の 3 つを行うこととする。

- ①： $A_1 \sim A_3$ 地点のようなコースに沿った旋回時では旋回方向にカメラを向ける。
- ②： $B_1 \sim B_5$ 地点のような障害物の回避時では、障害物のある方向にカメラを向けるようにする。

③：接触が発生する状況は、探索物の探索によりカメラの向きが走行に適していない状態で走行していることで発生することが多いため、探索時には移動ロボットを停止させる。

以上の 3 つのカメラ補助を取り入れて走行を行った場合の操作例を Fig.3.12 に示す。 $D_1 \sim D_3$ 地点では障害物と探索物が別々の方向にあるが、探索時にロボットが移動しないため、障害物を注視していない状況で走行が行われる可能性は低いといえる。

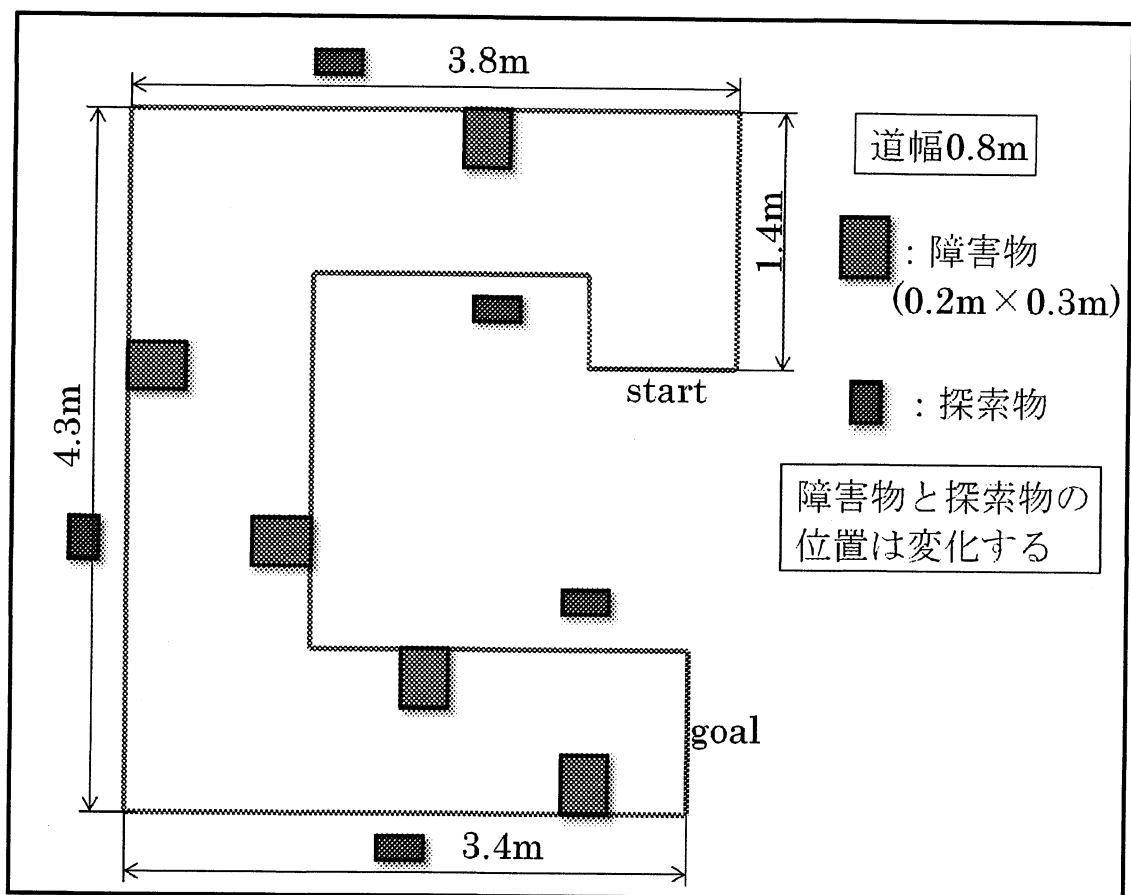


Fig.3.8 走行実験におけるコース

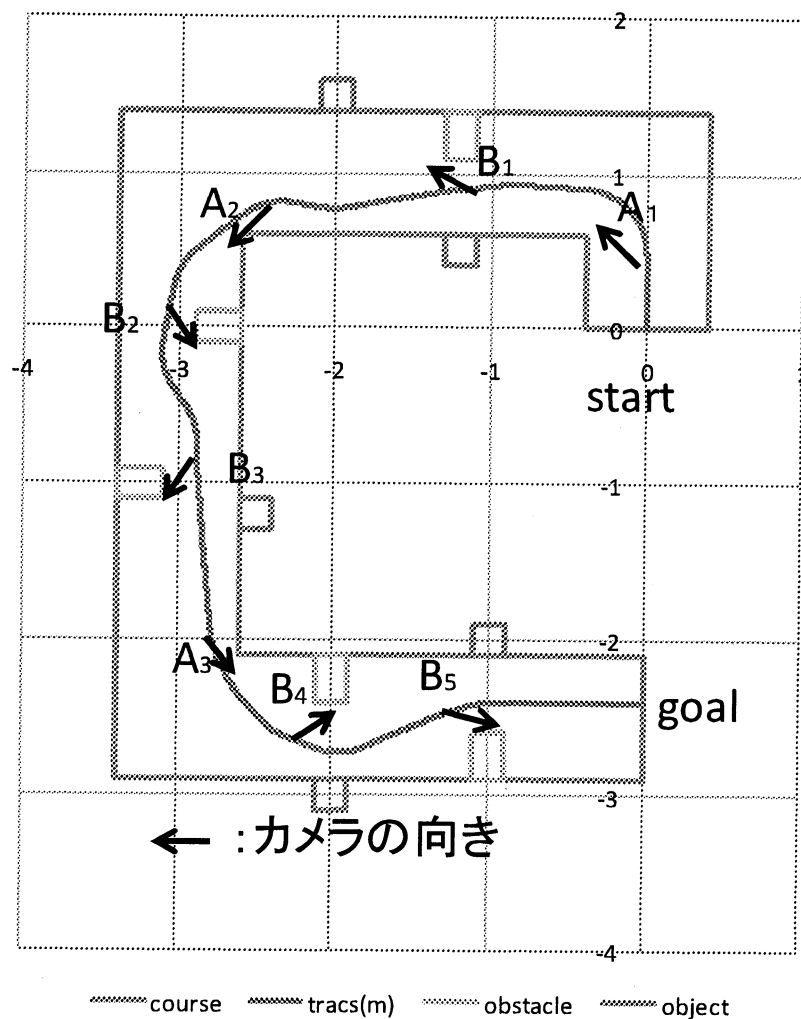


Fig.3.9.a 手法 α による走行軌跡例

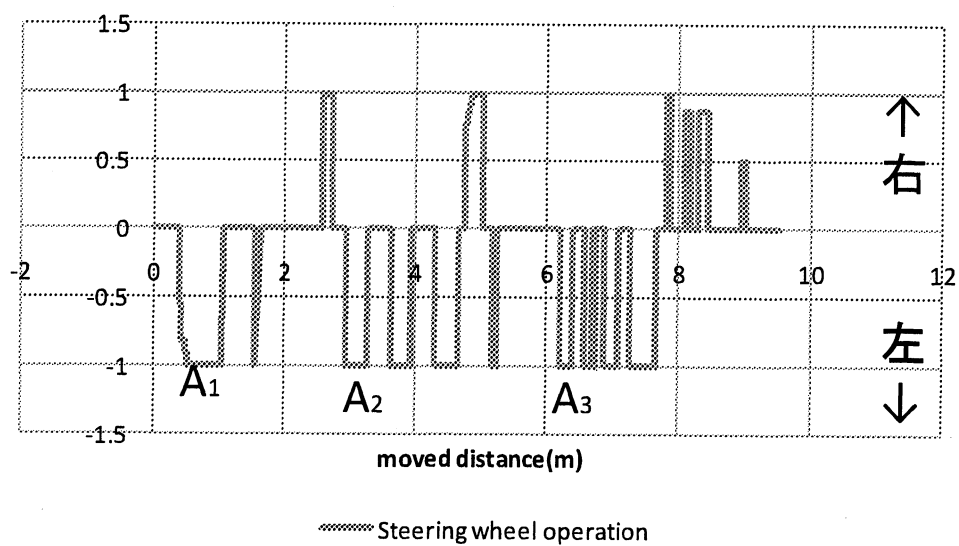


Fig.3.9.b 手法 α によるステアリングの操作例

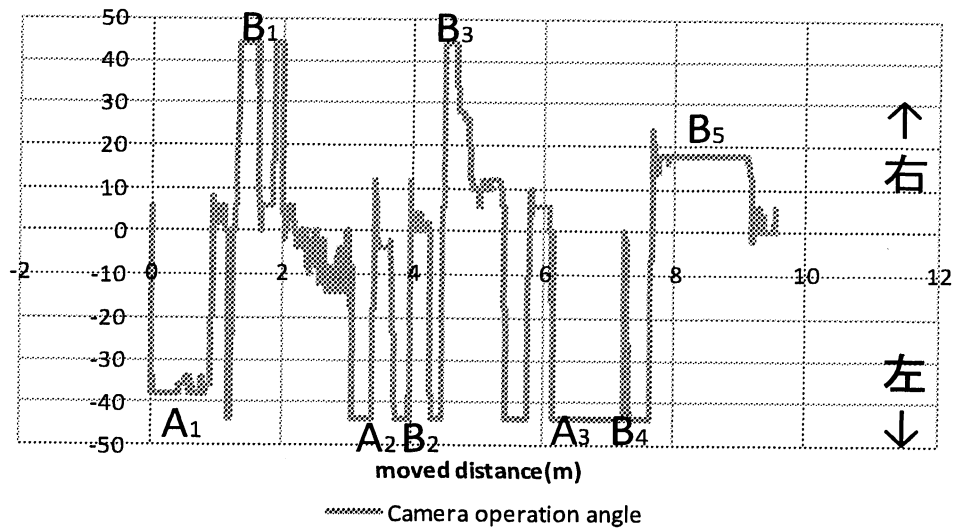


Fig.3.9.c 手法 α によるカメラ角の操作例

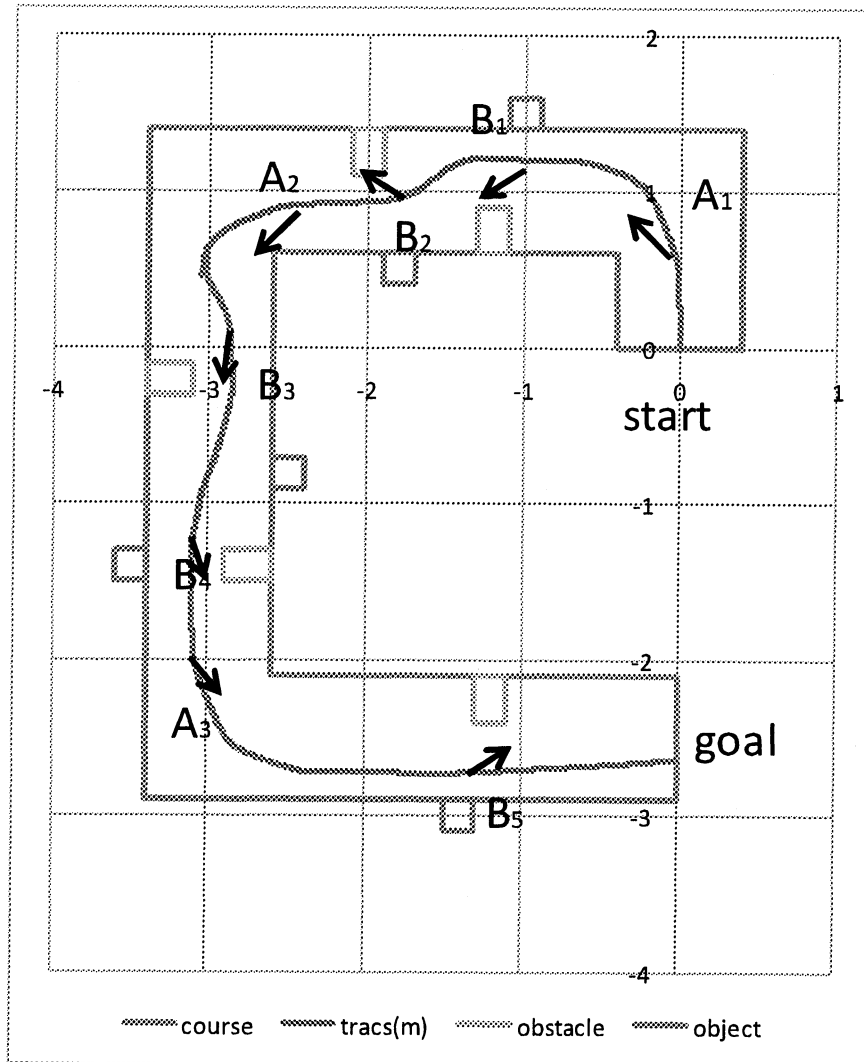


Fig.3.10.a 手法 β による走行軌跡例

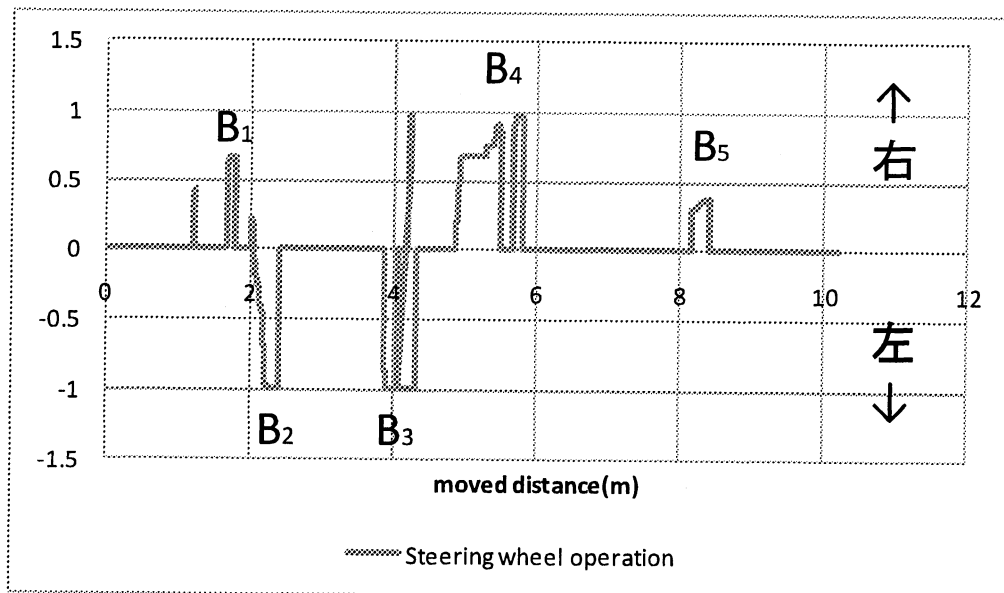


Fig.3.10.b 手法 β によるステアリングの操作例

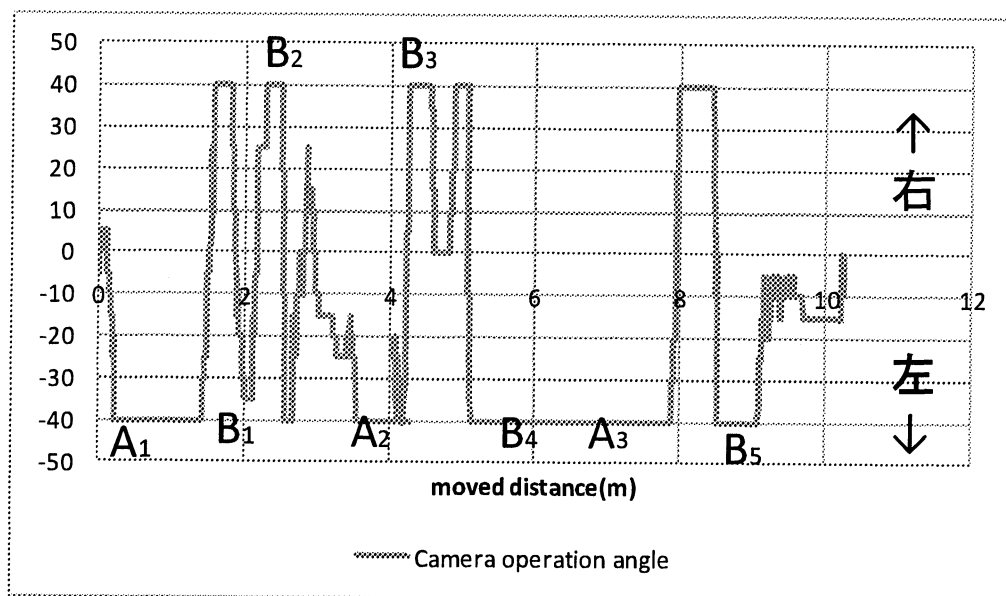


Fig.3.10.c 手法 β によるカメラ角の操作例

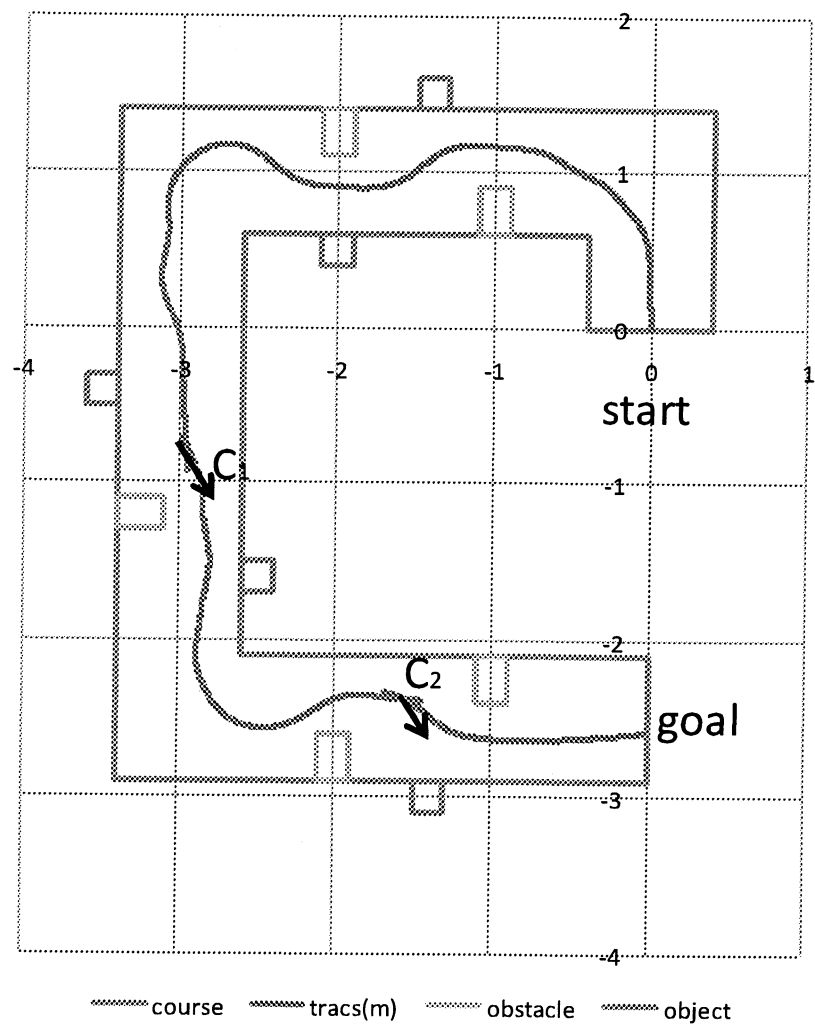


Fig.3.11.a 接触を伴う走行時の走行軌跡例

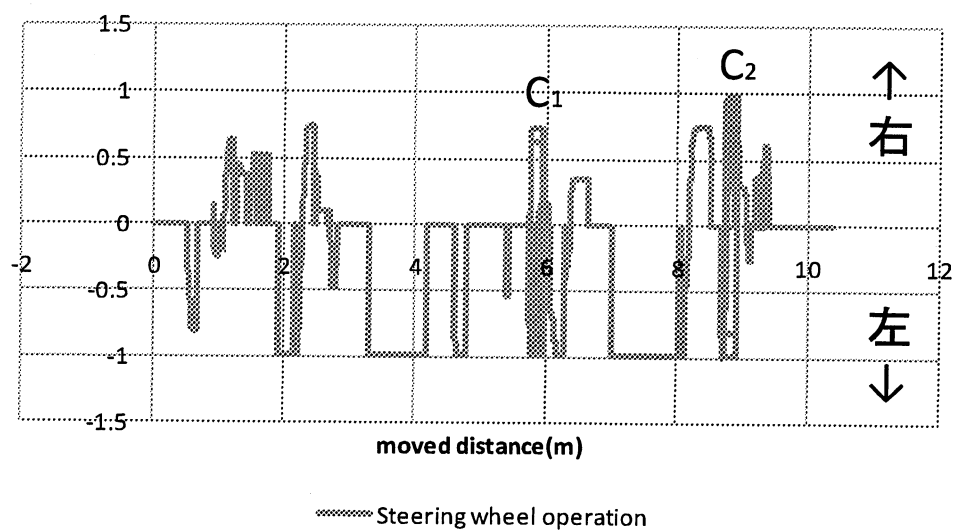


Fig.3.11.b 接触を伴う走行時のステアリングの操作例

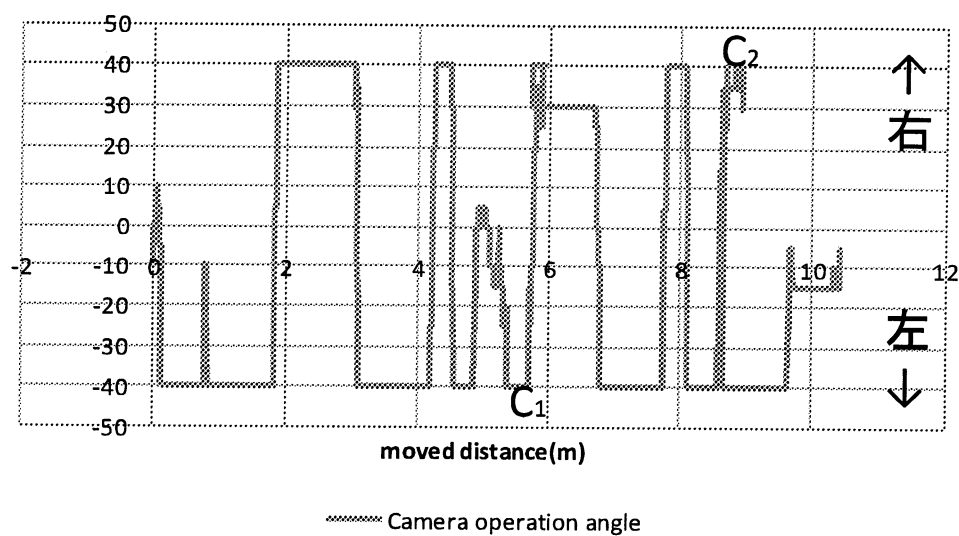


Fig.3.11.c 接触を伴う走行時のカメラ角の操作例

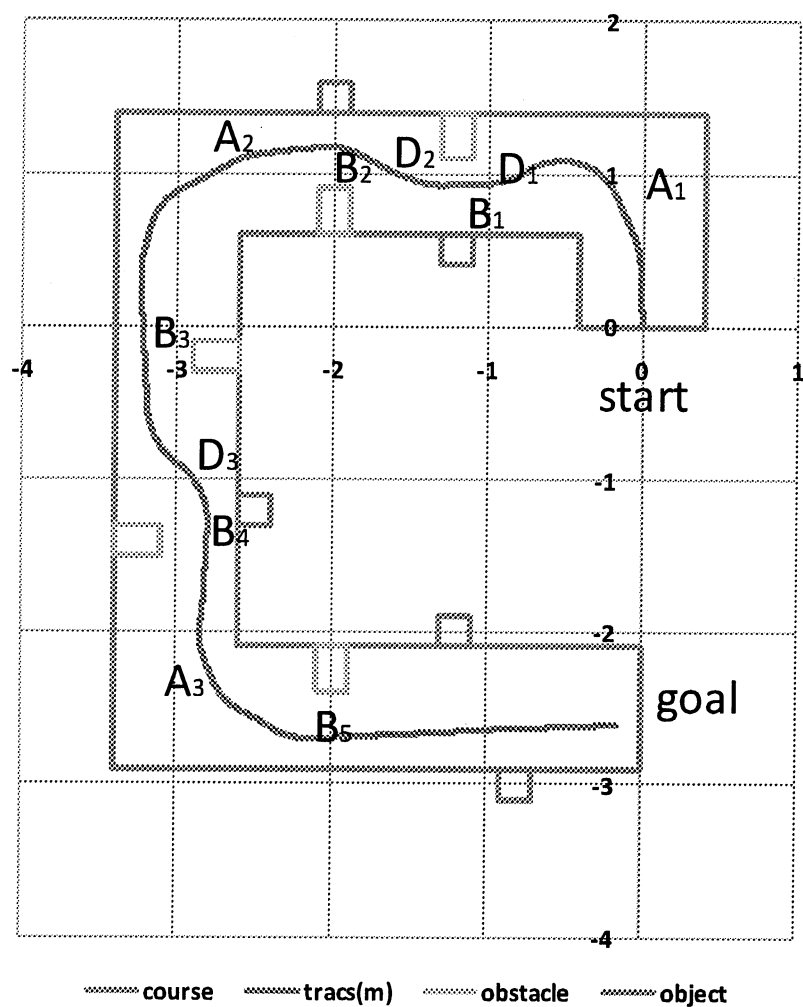


Fig.3.12.a カメラ操作の補助を用いた走行時の走行軌跡例

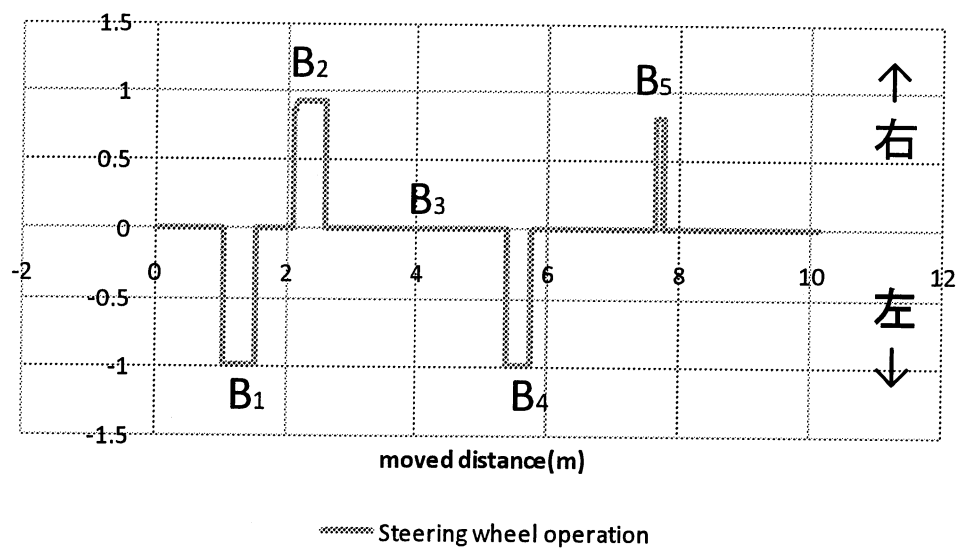


Fig.3.12.b カメラ操作の補助を用いたステアリングの操作例

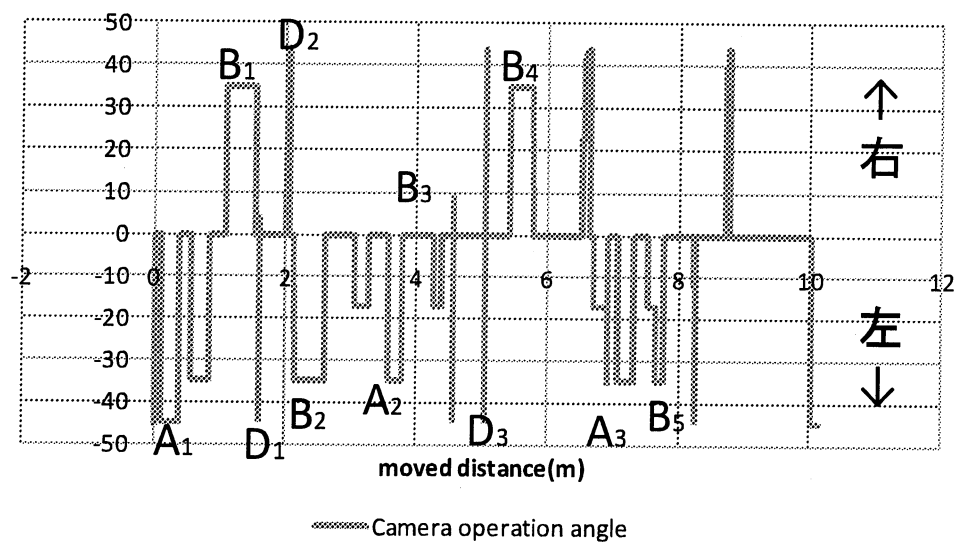


Fig.3.12.c カメラ操作の補助を用いたカメラ角の操作例

第4章 実験

4章では走行実験によって3章で説明した手法の比較を行い、提案手法の優位性を検証する。

4.1 実験方法

実験環境として 3.4.1 節と同様に Fig.3.7 のコースを用いる。比較として 3.1 節の手法 1 (手法 α とする) と 3.3 節の融合制御 (手法 β とする), 3.4 節のカメラ補助を用いた融合制御 (手法 γ とする) を用いる。事前に他のコースで練習し操作に習熟した 7 人の被験者に各 3 回ずつ走行を行ってもらう。

4.2 実験結果

実験の結果として、走行時間、衝突回数、探索成功数、操作者における走行と探索の手法 α における評価を 3 とした 5 段階の評点 (5: 操作しやすい~1: 操作しにくい) の平均を Table 4.1 に示す。衝突回数は移動ロボットの側面部に接触したものを弱接触、正面部に接触したものを強接触とする。

実験結果から、手法 γ が衝突回数、探索成功数がいずれも最も良く、手法 β も手法 α と比較して衝突回数、探索成功数が良い結果が出ており、どちらの補助も操作の正確性を向上させる働きがあったとわかる。また、操作者の評点でも同様の傾向が出ていることから、補助が操作者に不快感を与えることは少ないといえる。しかし、走行時間においては手法 α が優秀な結果となった。これは、旋回時に一定の旋回を行う手法 β 、 γ よりも手動で旋回を行う手法 α の方が速く旋回できるためと考えられる。また、手法 β と手法 γ の差は、3.4.3 カメラ操作の補助の③による探索中はロボットが停止する補助の影響を受けたと考えられる。

いずれの補助も操作者の操作量を減少させる形で働いており、操作者の負荷を減らすことで走行や判断の正確性を向上させることができると考えられる。

Table 4.1 実験結果

手法	走行時間(s)	弱接触(回)	強接触(回)	探索数(個)	走行評価	探索評価
α	65.9	1.0	1.0	4.3	3.0	3.0
β	72.5	0.95	0.42	4.6	4.0	3.4
γ	77.9	0.39	0.23	4.8	4.1	4.0

4.3 t 検定

提案手法の優位性を確認するため、操作の正確性を調査した弱接触、強接触と探索数について、式(4.1)(4.2)を用いて t 検定を行う。比較する両群を X_1, \dots, X_m および Y_1, \dots, Y_n (標本サイズは m および n) とする。

$$U_e = \frac{(m-1)U_x + (n-1)U_y}{m+n-2} \quad (4.1)$$

$$t_0 = \frac{|X - Y|}{\sqrt{U_e \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{n} \right)}} \quad (4.2)$$

U_e : 両群の分散の推定値

$m \cdot n$: 比較する群の標本サイズ (実験では 21 である)

t_0 : 検定統計量

統計量 T は自由度 $\nu = m + n - 2$ の t 分布に従う。 t 分布における t_0 の p 値を求め、有意水準 α と比較する。衝突回数、探索成功数における t 検定の結果を Table 4.2~4.4 に示す。検定は各組み合わせで行い (例: (α, β) では手法 α と β で比較), 5% 水準で有意差があった組み合わせは $*P < 0.05$ と記し、有意差がなかった組み合わせでは $P > 0.05$ と記した。

検定結果より手法 γ ではいずれの項目でも手法 α と比較して有意差があり、手法 β も手法 α と比較して有意差のある項目を確認できた。検定においても提案手法の優位性が確認できたといえる。

Table 4.2 検定結果(弱接触)

組み合わせ	平均値の差	t_0	検定結果
(α, β)	0.05	0.19	$P > 0.05$
(α, γ)	0.62	2.57	$*P < 0.05$
(β, γ)	0.57	2.27	$P > 0.05$

Table 4.3 検定結果(強接触)

組み合わせ	平均値の差	t_0	検定結果
(α, β)	0.58	2.14	$*P < 0.05$
(α, γ)	0.77	3.03	$*P < 0.05$
(β, γ)	0.19	0.86	$P > 0.05$

Table 4.4 検定結果(探索数)

組み合わせ	平均値の差	t_0	検定結果
(α, β)	0.3	1.64	$P > 0.05$
(α, γ)	0.5	2.57	$*P < 0.05$
(β, γ)	0.2	0.85	$P > 0.05$

第5章 結言

本論文では、危険な環境下の探索・走行を、カメラのみによって情報を得る遠隔操作ロボットを想定し、操作者が安全かつ容易に操作することを目標とした。操作者への負荷を減らし、操作の正確性を向上させるため、手動操作と自動操作のそれぞれの長所を組み合わせた融合制御と、手動操作例から 3 つのカメラ操作の補助を用いた。実験によって提案した手法によって操作の正確性を向上させることが可能かどうかを検証した。

手動操作

- 操作の正確性が操作者の技術に大きく影響する。
- 実験により走行コースを把握した状態であってもミスが発生しやすいことを確認した。

自動操作

- 事前の地図情報と実際の状況に違いがなければ安定した操作が行える。
- センサで捕えられないものに関しては対処することができない。

融合制御

- 自動操作から必要に応じて操作者が介入することで走行を行う。
- 予備実験から、手動操作と比較して操作者は少ない操作量でコースの走行と障害物を回避することができることを確認した。
- 実験によって操作の正確性が向上することを確認した。

カメラ操作の補助

- 接触のある操作例と接触の無い操作例から 3 つの補助を行った。
- カメラ操作の負荷を減らすことと、走行に適切なカメラの向きを与えることにより、操作者への負担の軽減を目的とした。
- 実験によって操作の正確性が向上することを確認した。

以上をまとめると、本論文で提案した手法を用いて、操作者の遠隔操作の負荷を軽減することで操作の正確性を向上させられることを実験によって確認した。

謝辞

本研究を進めるに際し、終始懇切なるご指導を賜った三重大学 加藤典彦 准教授に深く御礼申し上げます。ならびに、研究を遂行するにあたり貴重なご指導を頂いた三重大学 野村由紀彦 教授、松井博和 助教に深く感謝致します。

研究を行うにあたり数多くの貴重なご助言、ご指導をしていただき、また被験者として実験に協力していただいた三重大学工学部機械工学科メカトロニクス研究室大学院生諸氏、学部生諸氏に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 脇田, 平井, 町田, 萩本, 井床, 桂川, 安本 “知的モニタリングシステムとその宇宙用遠隔操作ロボットへの適用”, 日本ロボット学会誌, 17, 4, pp.540-548, 1999.
- [2] 藤田・鎌田・宮田, “機械操作における技量の抽出に関する研究(第2報, 操作時の認知能力の解明および操作支援への応用手法の提案)”, 日本機械学会論文集(C 編) 68 巻, 666 号, 2002.
- [3] 坂本, 神田, 小野, 石黒, 萩田 “複数カメラ切り替えに基づくコミュニケーションロボットの遠隔操作インタフェース(実証実験, HRI)”, 情報処理学会研究報告. ICS, [知能と複雑系] Vol.2006, No.131(20061213) pp. 37-42
- [4] 小田, “衛星搭載ロボットアームの遠隔操作模擬実験”, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.4, pp.540-548, 1999.
- [5] 山田・武市・武藤, “遠隔操作建設ロボットシステム用マスタ・スレーブ制御”, 日本機械学会論文集(C 編), Vol.66, No.651, 2000.
- [6] 津田・加藤・野村・松井, “実・仮想複合力覚提示型マスタ・スレーブシステム”, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.6, No.1, 2004.
- [7] 齋藤研作: “全方位映像・形状情報を用いた遠隔ロボット操縦インタフェースの提案と評価”, 電子情報通信学会, Vol.106, No.234(20060905) pp. 49-54
- [8] 佐藤徳孝: “遠隔操作ロボットにおける有効な提示カメラ画像の検証”, 第22 回日本ロボット学会学術講演会, 3A22, 2004
- [9] 岩瀬和也: “人間共存型ロボットの遠隔操作に関する研究(第24報): 迷路走行に対応する融合制御アルゴリズムの検討(ITSとロボット技術, 生活を支援するロボメカ技術のメガイnteグレーション)”, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2005, 42, 20050609
- [10] 杉浦篤: “自律遠隔融合制御の高度化”, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2003, 55, 20030000