

人間と計算機によるロボット群操作系

添田満・西部信博*

Cooperative control of mobile robots between human operator and computer

Mitsuru Soeda and Nobuhiro Nishibe

Abstract

This paper presents a method for human-computer cooperative control of multi mobile robots, where the computer system supports some cooperative actions between manual and automatic modes. In the system, the operation modes (autonomous operation mode, semi-autonomous operation mode, and semi-human operation mode) are selected according to the different working situations. In autonomous mode, the computer, which learned human technical skills in advance, controls robots to reach the goal while avoiding obstacles. As long as a priori information in the computer is accurate for the working environment, the computer operates robots by using a priori knowledge. When it is necessary to correct the motion of the robots because of some changes of working environment, human operator intervenes in computer operation to reduce the speed of the robot and change the course of the motion. The method, proven by some actual trials in mobile robots, realizes efficiencies in the operation of mobile robots with simplicity of commands and flexibility of skilled human operator.

Key words: Computer supporting system, autonomous operation, semi-autonomous operation, human operation,

1 はじめに

人間が作業を行うには危険を伴う場所でロボットの遠隔操作により作業を行う場合、人間と計算機のそれぞれの長所を生かした人間と計算機の協調操作システムが有効である⁽¹⁾。このようなシステムでは、通常は計算機による自律操作を行い、自律操作で対処できない状況に対しては人間が介入操作を行う⁽²⁾。協調操作システムでは、頻繁に人間が介入しては人間の負担を軽減できないので、人間の負担を軽減するために、計算機による自律操作の作業能力を高め、人間の意図する動作に近づける必要がある⁽³⁾⁽⁴⁾。また、ロボット単体ではその作業能力に限界があるため、複数のロボットをそろえて作業を行うほうが効率的に作業を進めることができる⁽⁵⁾。

そこで、本研究では、複数のロボット群の移動操作を対象とし、人間と計算機によるロボット群の協調操作システ

ムを提案する。

ロボット群は、あらかじめ人間の回避行動パターンを学習した計算機により回避方向の判断をして障害物を回避し、必要に応じて隊形を変更しながら目標点へ自律移動する。オペレータはその状況を監視し、途中ロボット群が、比較的単純な環境変化によりオペレータの意図しない動作をした場合には半自律操作に、自律操作で対応できないような複雑な環境変化に直面した場合には半手動操作に切り替えて状況に対応する。

半手動操作においてオペレータが操作を行う場合、群をなすロボットにそれぞれ指令を与えてはオペレータへの負担が増加してしまうので、本システムではオペレータとロボット群の間に操作支援エージェントを設ける。エージェントはロボット群全体を1つのロボットのようにみせるため、ロボット全体を閉曲線で囲み、この閉曲線を1つのロボット（以下仮想ロボットと呼ぶ）としてオペレータに提示し、オペレータはその仮想ロボットを見ながら、ロボット群全体に操作指令を与える。エージェントは、オペレータの指示したロボット群の動きとなるように、受け取った指令をそれぞれのロボットに分配して速度指令または隊形変更指令を与える。この指令に基づき個々のロボットは自律制御により移動する。また計算機支援システムが、操作環境に応じて人間の操作の度合（操作効率ゲイン）とロボット群の隊形を自動調整することにより、オペレータ操作の支援を行う。

以上のシステムを構築し、操作における有効性をシミュレーション実験により検証した。

2. システムの構成

本研究で構築した人間とロボット群の協調操作系システムを図1に示す。

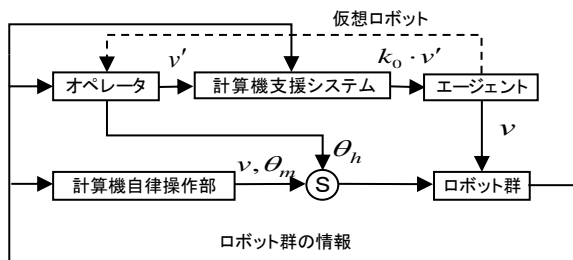
本システムでは、通常、ロボット群の情報をもとに計算機がロボット群を自律操作し、目標追従を行っている。オペレータはその状況を常に監視し、状況に応じて操作モードを手動で切り替える。本システムの操作モードは

- ① 自律操作
- ② 半自律操作
- ③ 半手動操作

の3つがある。

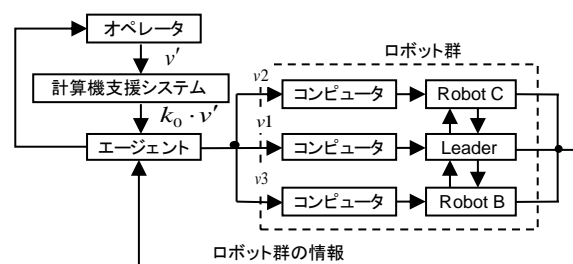
①の操作の場合、オペレータはまったく介入せず、あらかじめ人間の障害物回避行動パターンを学習した計算機自律操作部によって目標地点へ向かって自律移動を行う。途中、障害物があるような場合には計算機が回避方向を判断して障害物を回避して目標追従を行う。

②の操作の場合、計算機が各ロボットの速度制御を行い、オペレータはジョイスティックを用いてロボット群に



- v : 速度指令
 v' : オペレータの入力
 k_0 : 操作効率ゲイン
 θ_h : 目標角度指令(介入操作)
 θ_m : 目標角度指令(自律操作)

図1 協調操作システム



- v_1 : Leader Robot Aの速度指令
 v_2 : Robot Bの速度指令
 v_3 : Robot Cの速度指令

図2 操作エージェント

移動方向の修正角度を与え、ロボット群はその修正角方向に移動し壁や障害物を回避する。

③の操作の場合は、エージェントがロボット群を仮想ロボットと見立ててオペレータに提示し、オペレータはその仮想ロボットを見ながらジョイスティックを用いてロボット群を操作する。しかし、人間が介入操作する場合、壁からの距離が近い所ではロボットが一気に大きく動いてしまうと危険である。逆に、壁からの距離が遠い所では一気に動かしたほうが効率が良い。そのため環境の状況に応じて介入操作の度合を調整する必要がある。そこで、計算機支援システムが、ロボットの速度と障害物からの距離をもとに、ジョイスティックに対するロボットの動作感度(操作効率ゲイン)を調節する。図2に示すように、この操作効率ゲインを反映させたオペレータの動作指令がエージェントに送られ、エージェントはこの動作指令を各ロボットの車輪速度指令に分配し、それぞれのロボットへ与える。この指令に基づきそれぞれのロボットは自律移動を行う。

3. ロボット群の制御

3. 1 自律ロボット群

本研究では、3台のロボットから成るロボット群の目標追従行動を対象とする。ロボット群の操作を行いやすくするために、図3に示すように、ロボット群の中の1台をリーダーロボットとし、常にロボット群の中心に位置づける。また、リーダーロボットの座標(Px, Py)をロボット群(仮想ロボット)の重心座標とする。リーダーロボットは目標地点へ自律走行を行う。他のロボットは隊形指令により決定されるリーダーロボットからの角度 α 、距離 z をもとに目標位置を決定し、隊形を維持しながら自律移動を行う。

3. 2 ロボット群の隊形

ロボット群は、常時基本隊形で移動を行っているが、目標地点へ到達するまでに、狭路や障害物があるなどさまざまな障害の影響で、基本隊形では目標地点へ到達することができない場合に、障害物を回避するために隊形を変更する必要がある。

本研究では基本隊形の他に代表的な隊形を3つ用意し、これらを状況に応じて使い分けて障害を回避し、目標を追従する。ロボット群の4つの隊形パターンを図4に示す。基本隊形をパターン1とし、障害が発生し回避を行うとき以外は基本隊形で常に移動する。

図5に、ロボット群が正面の障害物を右方向回避し目標地点へ向かう場合、狭路を走行する場合についての例を示す。図5(a)の場合、基本隊形のままでは障害物に衝突してしまうので、基本隊形からパターン2に隊形を変更し斜めに移動する。そこから、パターン4に隊形を変更して障害

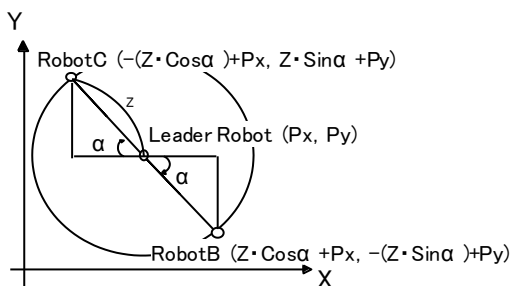


図3 ロボットの配置

物に沿って移動し、センサが障害物を検知しなくなった地点で基本隊形に戻し目標地点へ向かう。図5(b)の場合は、進行方向に狭路があるので、ロボット群はリーダーロボットからの距離 z を調整することにより回避する。 z の初期値を z_0 とすると、目標値 z_m は5.2節の操作効率ゲイン k_0 を用いて以下の式で決定される。

$$z_m = z_0 \cdot k_0 \tag{1}$$

この z_m と z の差 $e_z = z_m - z$ と z の変化分 dz を前件部とし、ファジィ推論を行って Robot B と Robot C の車輪速度変化分 dr を求める。この dr を Robot B の右車輪速度 V_R^B と Robot C の左車輪速度 V_L^C に加え z を調整する。

$$V_R^B = V_R^B + dr \tag{2}$$

$$V_L^C = V_L^C + dr \tag{3}$$

4. 計算機による自律操作

4. 1 位置認識と障害物検知

ロボットは常に位置認識と障害物検知を行い、自律操作を行っている。以下に位置認識と障害物検知の方法を示す。図6は移動ロボットの概形と移動平面を表す。両車輪の回転速度を V_R 、 V_L 、車体中心から車輪までの距離を d 、車体の進行方向の角度を θ とする。また、車体中心の並進速度を V 、角速度を ω とすると、

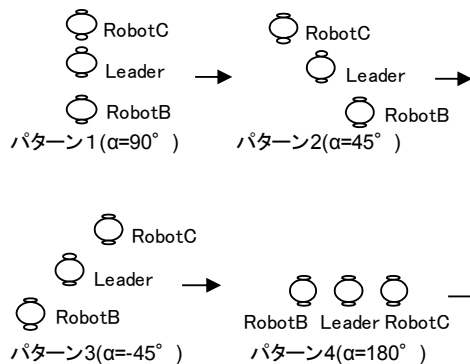


図4 ロボット群の隊形パターン

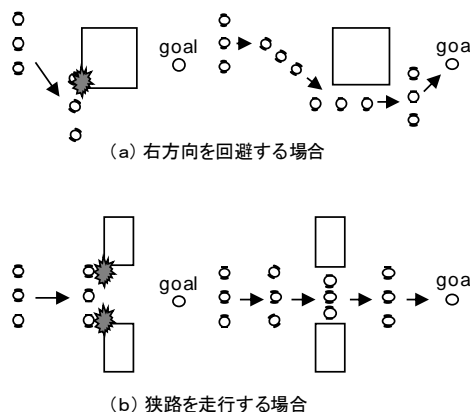


図5 ロボット群の隊形変更

$$V = \frac{V_R + V_L}{2} \tag{4}$$

$$\omega = \frac{V_R - V_L}{2d} \tag{5}$$

となる．ロボットの位置の一般化座標と，車体中心の並進速度，角度の関係を離散時間系で表すと以下の様になる．ここで， Δt はサンプル時間である．

$$X(k+1) = X(k) + V \cos \theta \cdot \Delta t \tag{6}$$

$$Y(k+1) = Y(k) + V \sin \theta \cdot \Delta t \tag{7}$$

$$\theta(k+1) = \theta(k) + \omega \cdot \Delta t \tag{8}$$

この式により，移動開始時から座標位置を順次計算することができる．

本研究では，ロボットの前方に等間隔に配置された 5 個のセンサを使用した．センサは，進行方向に対して θ_o の方向に障害物を検知した場合に，障害物までの距離を計測できるようになっている．図 7 はセンサ 2(s2) と正面方向のセンサ 3(s3) が障害物を検知した場合を示している．

4. 2 目標位置追従

4. 2. 1 車輪速度の決定

本研究では車輪の速度決定に簡略ファジィ推論を用いた．進行方向の障害物までの距離 r_g または目標地点までの距離 r_s の距離が近い方を r_n とし， r_n とロボットの並進速度 V を次のようにルール化した． dv は速度修正量である．

IF r_n is A_i AND V is B_i THEN dv is ω_i

A_i, B_i はファジィ集合， ω_i は後件部メンバーシップ関数のシングルトン実数値である．

これにより，ロボットの左右車輪速度は

$$V_R = V + dv \tag{9}$$

$$V_L = V - dv \tag{10}$$

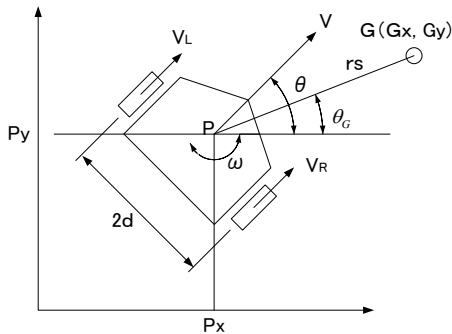


図 6 移動ロボット

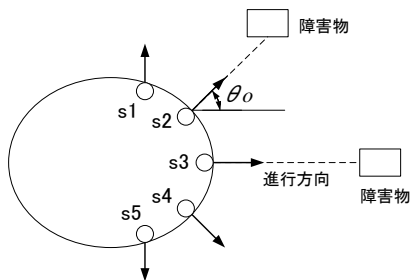


図 7 移動ロボットのセンサ

となる．

4. 2. 2 操舵角の決定

ロボットが目標地点に向かうよう操舵するために，目標地点の角度 θ_G とロボット進行角 θ との差 $e_n = \theta - \theta_G$ と角速度 ω を入力とし，角速度修正量 $d\omega$ をファジィ制御する．

・ $d\omega \geq 0$ のとき

$$V_L = V_L + d\omega \tag{11}$$

V_L がロボットの最大速度を超える場合は，

$$V_R = V_R - d\omega \tag{12}$$

・ $d\omega < 0$ のとき

$$V_R = V_R - d\omega \tag{13}$$

V_R がロボットの最大速度を超える場合は，

$$V_L = V_L + d\omega \tag{14}$$

このように，左右の車輪に速度差をつけることで，角速度を与え操舵角を得ることが出来る．

4. 3 障害物回避行動

4. 3. 1 回避行動パターンの学習

ロボットが障害物を検知した際に，左右どちらの方向に移動して回避すればよいのかを人間がその都度指示しては人間への負担が軽減されない．また，回避する方向を計算機が決定するにしても，状況に応じて左右どちらの方向へ移動すれば効率良く目標地点に到達することが出来るのを見極めて回避する方向を決定しなければならない．人間は経験により高度なパターン認識能力を有しているが，計算機は経験的な判断が出来ないため，与えられた情報に少しでも相違点があるとうまく機能しない．

そこで本システムでは，ロボットの自律機能を高めるために，ニューラルネットワークを用いて，右折する，左折する，目標を追従するといった人間の回避行動パターンを計算機に学習させる．

学習は，人間が操作した際の操作データから，どの行動パターンを選択したかを表す行動選択データを作成し，その行動選択データを教師信号として，誤差逆伝播学習により行う．行動選択データは，選択されたパターンを 1，選択されなかったパターンを 0 とする．行動パターンの選択の有無は，人間が与えた操舵角指令 θ_h から以下のように決定する．

$$|\theta_h| \leq \varepsilon \quad : \text{目標追従}$$

$$\theta_h < -\varepsilon \quad : \text{左方向回避}$$

$$\theta_h < \varepsilon \quad : \text{右方向回避}$$

ここで， ε はあらかじめ設定した閾値である．行動選択データを [目標追従, 左方向回避, 右方向回避] と表すと，選択された行動パターンが目標追従なら [1, 0, 0]，左方向回避なら [0, 1, 0]，右方向回避なら [0, 0, 1] となる．

本研究で用いた 3 層ニューラルネットワークの構造を図 8 に示す．入力層ユニットに対する入力を $x_j (j=1, 2, \dots, l)$ ，中間層各ユニットに対する入力の総和を X_j ，出力を $y_j (j=1, 2, \dots, m)$ ，出力層各ユニットに対する入力の総和を Y_k ，出力を z_k ，教師信号を $\hat{z}_k (k=1, 2, 3)$ とする．入力層-中間層間の結合係数を u_{ij} ，中間層-出力層間の結合係数

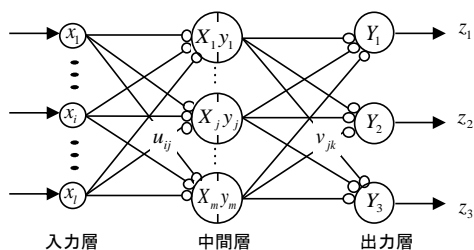


図 8 ニューラルネットワーク

を v_{jk} で表現する。本研究では、ネットワークの入力 x_i をリーダーロボットのセンサ値とし、入力パターン p における各出力ユニットの誤差の総和を

$$E = \sum_p \sum_k \frac{1}{2} (\hat{z}_{k,p} - z_{k,p})^2 \quad (15)$$

とする。 E の値が任意の閾値を下回るまで学習を行う。

4. 3. 2 サブゴールの決定

ロボットが人間の回避行動パターンを学習することにより、計算機が人間と同じように回避方向の判断を行うことが出来るようになる。しかし、計算機が回避方向を決定しても、障害物に対してどの程度右折あるいは左折を行えばよいかを決めなければ障害物を効率よく回避することは出来ない。そこで、本研究では、障害物を効率よく回避するために、計算機の回避方向の判断にもとづいたサブゴールを決定する。

図 9 のように、障害物をセンサが検知すると、計算機が回避方向を判断し、ロボットに目標指令角度 θ_m (右方向回避のときは $\theta_m = \pi/2$, 左方向回避のときは $\theta_m = -\pi/2$) を与える。ロボットはその指令に従いロボットの進行角度が θ_m と等しくなるまで旋回する。ロボットは旋回中にセンサが障害物を検知しなくなった時点で旋回を止める。センサが障害物を検知しなくなった時点の、1 時点前は障害物の角を検知しているの、障害物の角の座標 (O_x, O_y) を得ることが出来る。ロボットは (O_x, O_y) よりも外側を通れば障害物に衝突することはない。よって、 x 軸方向、 y 軸方向にそれぞれ任意の値 ϵ_G ずつずらした位置をサブゴールとしロボットはサブゴールに追従する。

5. 人間と自律ロボット群の協調操作系

5. 1 半自律操作

ロボット群が、比較的単純な環境下でオペレータの意図しない動作をした場合には、オペレータが判断して半自律操作に切り替えることが有効である。半自律操作では、ロボット群の速度を計算機が制御し、オペレータは図 10 に示すジョイスティックを用いてロボット群に移動方向の修正角 θ_h を与える。ロボット群は θ_h の方向へ向きを変えながら自律移動し障害物を回避する。 θ_h は、 x 軸方向にジョイスティックを傾けた度合い X と y 軸方向にジョイスティックを傾けた度合い Y を用いて以下の式により求められる。

$$\theta_h = \tan^{-1} \frac{Y}{X} \quad (16)$$

θ_h は、ジョイスティックを操作する度に更新される。しかし、 θ_h がジョイスティックを軽く傾けただけで更新され

てしまうと、オペレータの意図しない入力が行われる可能性がある。そこで、オペレータがロボット群に目標角度を与えたいときだけ、つまり、ジョイスティックを強く傾けたときにだけ θ_h を更新するように閾値を設定した。

オペレータの入力の絶対値 A は、

$$A = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (17)$$

となる。 A の最大値を r とし、閾値を r' とするとオペレータの入力は、 A が $r' \leq A \leq r$ となる場合のみ有効となる。

5. 2 半手動操作

自律操作, 半自律操作では対応できないような複雑な環境下においては、オペレータが判断して半手動操作に切り替える。この操作モードでは、ジョイスティックを x 軸方向に倒すと旋回し、 X 成分が 0 のときに、奥に倒すと前進、手前に引くと後進する。また、速度は A に比例する。このように、オペレータの指令だけがロボット群の動作に反映されるので、人間の経験と融通性を生かした複雑な環境下での操作に適している。しかし、図 11 (a) のように近くに障害物がある状況で、オペレータが介入し半手動操作に切り替え、オペレータからの指令をそのままロボット群に与えていては、障害物に衝突する危険性がある。そこで、図 11 (b) のようにオペレータからの指令に対してロボット群が、進行方向に障害物がない場合には速く、ある場合には遅く動くなど、環境に応じて介入操作の度合いを調整する機能が必要である。

また、リーダーロボット以外のロボットの進行方向に障害物がある場合には、その障害物を回避するために、その都度オペレータが操作して隊形変更させているのはオペレータに負担がかかる。オペレータが、リーダーロボット以外のロボットを気にすることなく障害物を回避することができれば、オペレータの負担を軽減することができる。

そこで、本研究では、オペレータの操作時に、計算機支援システムが環境に応じてオペレータ操作の動作感度 (操作効率ゲイン) とロボット群の隊形を調整してオペレータの操作を支援する計算機支援システムを付加する。

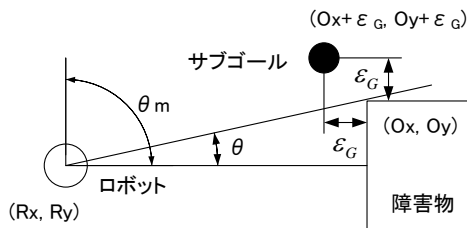


図 9 自律操作による障害物回避

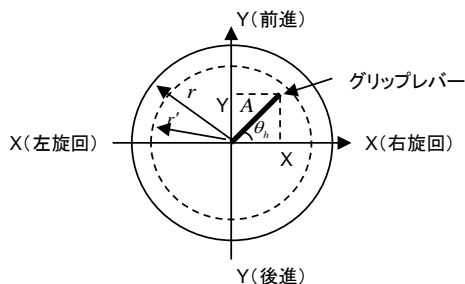


図 10 ジョイスティック操作

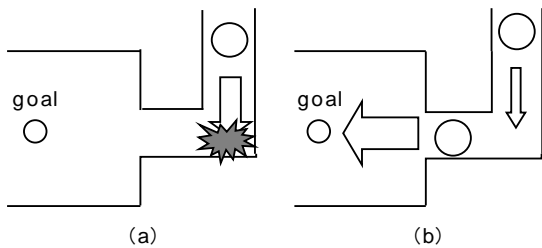


図 11 操作効率ゲインの必要性

本システムでは、オペレータから移動指令を受けた際に、障害物からの距離 r_s とオペレータの入力 v' とし、 r_s と v' を次のようにルール化した。 k'_0 はゲインである。

IF r_s is A_i AND v' is B_i THEN k'_0 is ω_i

A_i B_i はファジィ集合、 ω_i は後件部メンバーシップ関数のシングルトン実数値である。

操作効率ゲイン k_0 は、 k'_0 を 1 で正規化して

$$k_0 = k'_0 / 0.5 \tag{18}$$

となる。

右車輪と左車輪へのオペレータの入力をそれぞれ v'_R 、 v'_L とすると、右車輪速度 v_R と左車輪速度 v_L は

$$v_R = k_0 \cdot v'_R \tag{19}$$

$$v_L = k_0 \cdot v'_L \tag{20}$$

となる。

6. シミュレーション実験

6. 1 自律操作による目標追従

図 12(a) に示す環境において、あらかじめ人間の回避行動パターンを学習させた計算機の自律操作によりロボット群を目標地点へ到達させるシミュレーションを行った。図の黒い四角は障害物であり、ロボット群には障害物の情報は与えていない。

図 12(b), (c) の①, ②, ③, ④はロボット群がスタートしてから目標地点へ到達するまでの状態を表しており、図 12(d) はロボット群の重心の速度を表している。また、点線の楕円はロボット群を表している。

- ① ロボット群がまだ障害物を検知していない状態
- ② ロボット群が障害物を検知し、サブゴールへ向かっている状態
- ③ ロボット群が障害物に沿って移動している状態
- ④ 障害物を回避し終え、目標地点へ向かっている状態

リーダーロボットが、未知障害物を検知すると計算機は左方向回避と判断し、左方のサブゴールへ向かい障害物回避を行っている。また、ロボット群の状態が、①→②→③→④と推移すると、ロボット群は状態に合わせて図 12(c) のように、パターン 1 (基本隊形) →パターン 2 →パターン 4 →基本隊形と隊形を変更している。

あらかじめ計算機に人間の回避行動選択パターンを学習させることにより、計算機は未知障害物に対して回避方向の判断を行い、環境に応じて隊形を変更することで、未知障害物を回避した。これにより、ロボット群は計算機による自律操作で未知障害物を回避し、目標地点へ到達することが出来る。

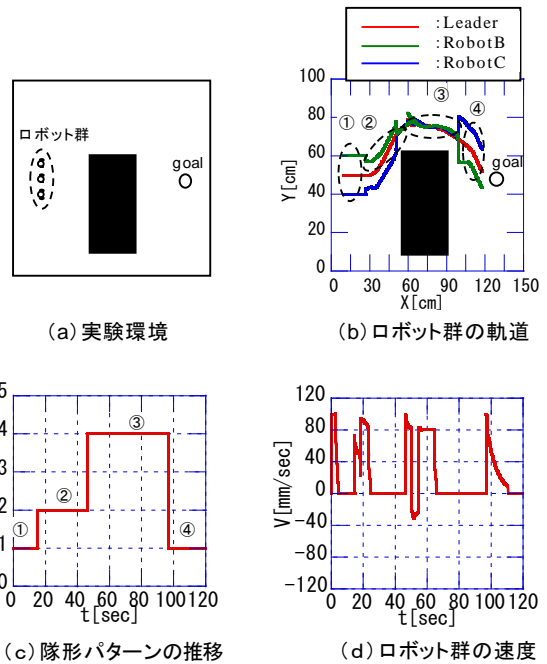


図 12 自律操作による目標追従

6. 2 半手動操作によるロボット群の移動

計算機支援システムを構成し、半手動操作によるシミュレーションを行った。図 13(a) に実験環境を示す。ロボット群は広い通路から狭い通路へとオペレータの手動操作により移動し目標地点へと到達させる。

スタートしてから①の地点までは、道幅も広く周りに障害物もないので、図 13(c) の操作効率ゲインが大きくなり、図 13(d) オペレータの入力に対するロボット群の動作感度は高い。①の地点以降はロボット群が壁に近づくので操作効率ゲインは小さくなり、②の狭路の入り口付近に来たときに最も小さくなる。これにより、オペレータの入力に対するロボット群の動作感度が下がり、オペレータは操作しやすくなる。また、スタートした時点での隊形の大きさでは狭路に入ることが出来ないで、計算機支援システムが Robot B の左車輪と Robot C の右車輪に図 13(e) の車輪速度変化分を加え隊形の大きさを調整して狭路に入り目標地点に到達している。

以上のように、オペレータの操作中にオペレータ操作の度合いと隊形の大きさが計算機支援システムにより調節されることにより、オペレータの操作性が上がり、入り組んだ環境でも容易にロボット群を操作することが可能となる。

6. 3 半自律操作による障害物回避

ロボット群が、オペレータの意図しない動作をした場合を想定したシミュレーションを行った。図 14(a) において、中心の黒丸はセンサで検知することの出来ない障害物で、ロボット群は目標地点へ向けて直進している。障害物に気づいたオペレータが半自律操作に切り替えて自律操作を修正し障害物回避を行った。

図 14(c) に示す介入操作フラグが 0 のときは、オペレータからの入力がない状態を表しており、ロボット群は目標地点へ向かって走行している。一方、介入操作フラグが 1 のときは、ロボットは計算機により速度制御され、オペレータから移動方向の修正角度 θ_h が与えられている状態を

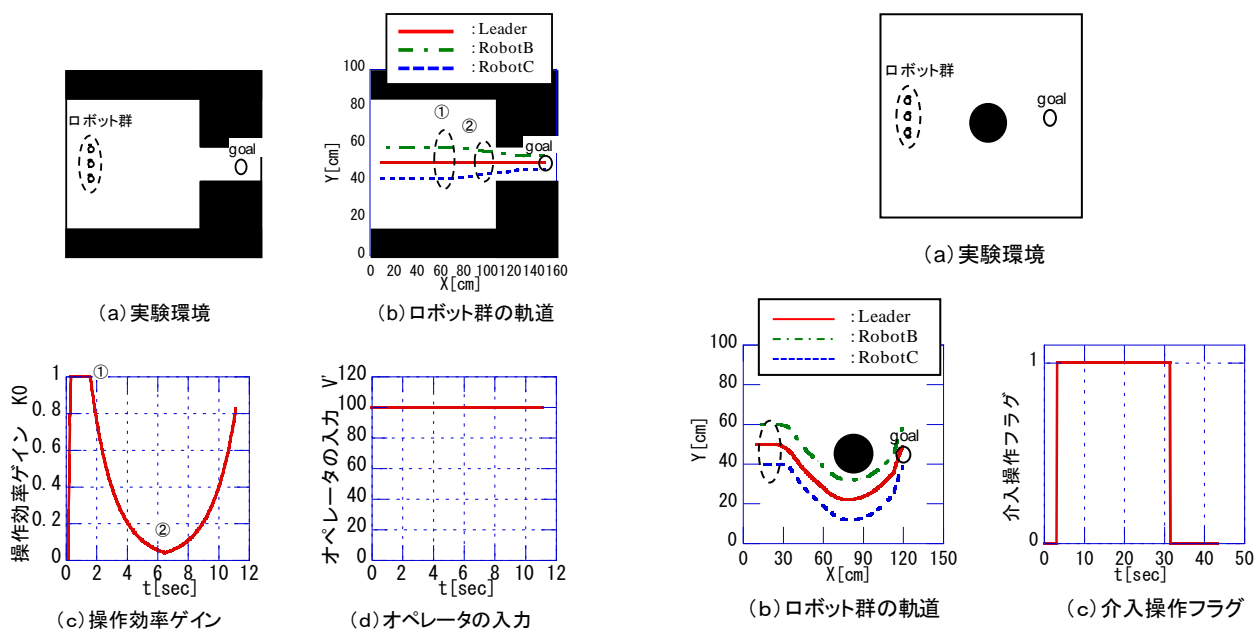


図 14 半自律操作による障害物回避

とができる。さらにオペレータは個々のロボットに操作指令を与えるのではなく、エージェントから提示される仮想ロボットを見ながらエージェントにロボット群全体の操作指令を送ればよいため、操作性の改善がはかられている。

本システムは、複数の自律ロボットを人間の回避行動パターンを学習した計算機と人間が協調して操作する事により作業のバリエーションを広げ、未知要素を含む環境や状況が変化する環境においても柔軟に対応することで、作業を効率よく行う事が可能になると考えられる。

参考文献

- (1) 平井：Shared Autonomy の理論，日本ロボット学会誌，Vol. 11, No. 6, 788/793 (1993)
- (2) 古谷，添田，高木，檜山：IT 技術を用いた計算機・人間協調型防犯防災用警備ロボットの開発環境資源工学会誌，Vol. 52, No. 4, 215/218 (2005)
- (3) M Soeda, T. Furuya: Human-computer cooperative mobile robot control with learning functions Proceedings of IEEE TENCON Analog and Digital Techniques in Electrical Engineering, Paper ID 1256, (2004)
- (4) 安野，鎌野，鈴木，原田，片岡：人間の状況判断機能と操縦スキルを模擬した自律型移動ロボットの走行制御，電学論 C, Vol. 118, No. 12, 1698/1705 (1998)
- (5) 根，福島，松野：衝突回避を考慮した複数移動体のモデル予測編隊制御，計測自動制御学会論文集, Vol. 42, No. 8, 877/883 (2006)

(2010 年 10 月 15 日 受理)

図 13 計算機支援システムによる半手動操作

表しており，ロボット群は方向を θ_h 修正し移動する。ロボット群はオペレータが半自律操作に切り替え介入することで，センサで検知することの出来ない障害物に衝突することなく目標地点へ到達することが出来た。

7. おわりに

本研究では，複数の自律ロボット群の移動操作を対象とし，人間と計算機によるロボット群の協調操作システムを構築した。本システムでは，ロボット群は通常は計算機の自律操作により目標地点へ向け自律移動する。障害物や壁などが進行方向に存在する場合には，あらかじめ人間の回避行動パターンを学習した計算機が人間の回避パターンにしたがってロボット群の回避方向を判断し回避移動を行う。途中，人間の意図しない動作をロボット群が行う場合や，センサで検知できない障害物が発生する場合など，計算機の自律操作で対応できない状況が生じると，人間が計算機の自律操作から状況に合わせて半自律操作，半手動操作に切り替えてそれらの状況に対応する。半自律操作の場合には，ロボット群の速度は計算機により制御されており，オペレータは移動方向修正指令を与える。ロボット群はオペレータから与えられた修正角度へ向かって移動し，障害物を回避することができる。半手動操作の場合には，計算機支援システムにより操作効率ゲインの調節と隊形の大きさの自動調整を行うので，複雑な環境でも難なく操作するこ