

操作支援エージェントを有するロボット群操作系

添田満・山本晃二*

Multi-robot operation system with supporting agent for human operator

Mitsuru Soeda and Kouji Yamamoto

Abstract

This paper presents a cooperative control system of multi mobile robots between human operator and computer, where the agent system helps human operator to operate robots easily. In this system, as long as a priori information of the working environment given to the computer is accurate, the computer operates robots in safe and correct manner. When the computer cannot cope with some changes of working environment, human operator, observing the situation, switches the operation modes (autonomous operation mode, human operation mode 1, and human operation mode 2) to intervene in the computer operation and gives instructions of a group of robots to the agent without sending instructions to each robot. The proposed system makes it possible to adapt to changed situation flexibly by cooperation between human operator and computer even when the working environment has changed and realizes efficient multi robots operations with both simplicity of commands and flexibility of skilled human operators. Through some actual trials in mobile robots, the proposed method is proven to be practical in the operation of multi robots even though information for the assigned jobs was not complete.

Key words: Mobile robots, multi robots, cooperative control, agent system, 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は、ロボットの遠隔操作を用いて作業を行うことが有効である⁽¹⁾。ロボットの操作には、人間の遠隔操作により作業を行う場合と、計算機の自律操作により作業を行う場合が考えられる。人間が操作を行う場合の長所は、状況に応じて臨機応変に対応できるといった点である。しかし、人間が複雑な環境下でロボットを操作するには熟練した技術が必要とし、長時間にわたる操作には疲労を伴うなどの問題が生じる。一方、計算機の自律操作は、予め情報を与えておけば長時間正確な作業が行え、人間の熟練した技術が必要とせず高度な操作を行うことができる。しかし、予期せぬ障害や環境の変化などが生じた場合、人間のように臨機応変に対応することはできない。

そこで、人間と計算機のそれぞれの長所を生かした協調操作システムが有効であると考えられる⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。このような協調操作システムとして、計算機による自律操作と人間による手動操作を状況に応じて切り替えて対応するシステムが考えられる。このシステムでは、予期せぬ障害や環境の変化などが生じ、自律操作で対処できない状況に対してはオペレータが手動操作に切り替える。しかし、複雑な環境下でロボットを手動操作するには熟練した技術が必要とし、オペレータに負担がかかる。そこで、手動操作の場合に計算機が人間の操作を支援する事で人間の負担を軽減することができる。

本研究では、オペレータの操作支援エージェントを付加した人間と計算機の協調によるロボット操作システムを提案する。ロボット単体では、その作業能力に限界があり、複数のロボットが共同で一つの作業を行うことで効率的に作業を進めることが可能になる。そのため本研究では複数のロボットの移動操作を対象とする。

通常は自律操作モードで、ロボット群は障害物を回避し、必要に応じて隊形を変更しながら目標地点へ自律移動する。オペレータはロボット群の状況を監視し、移動途中に、ロ

ボット群がオペレータの意思とは異なる動作をした場合には、手動操作モードに切り替えて目標地点へ移動させる。手動操作モードでは、手動操作を行う際にオペレータが、それぞれのロボットに指令を与えてはオペレータに負担がかかってしまうので、オペレータとロボット群の間にエージェントを配置する。エージェントはロボット群を一つの仮想ロボットと見立ててオペレータに提示する。オペレータはその仮想ロボットを見ながら、エージェントに操作指令を与える。指令を受け取ったエージェントは、それぞれのロボットに速度指令を分配する。さらにロボット群が障害物などが点在する複雑な環境に遭遇した場合には、状況に応じてエージェントがそれぞれのロボットの車輪速度を調整し、障害物に衝突しないように操作支援を行う。

2. システムの構成

本研究では、人間とロボット群の協調操作システムを構築した。図1にシステムの構成を示す。

本システムでは、通常はロボット群は自律移動し、その状況をオペレータが監視して状況に応じて操作モードを手動で切り替える。操作モードには、自律操作モード、手動操作モードの2つがある。さらに、手動操作モードには、手動操作モード1と手動操作モード2がある。

自律操作モードの場合は、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、目標地点へ向かって自律移動を行う。途中に障害物がある場合は、計算機がロボット群の進行方向を調整して障害物を回避して目標追従を行う。この操作モードは、環境が既知で作業情報が正確で人間の意志を反映する必要のない場合に有効である。

手動操作モード1の場合は、エージェントがロボット群をまとめて1つの仮想ロボットとして、その形を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エージェントに指令を与える。指令を受け取ったエージェントは、仮想ロボットの動きになるように車輪速度指令をそれぞれのロボットへ分配する。

このようにエージェントを用いることで、オペレータが 1 つ 1 つのロボットに個別に指令を与えなくて済み、オペレータの負担を軽減することができる。手動操作モードではオペレータの指令のみがロボット群の動作に反映されるので、オペレータの意図する動作をロボット群にそのまま行わせることができる。

手動操作モード 2 の場合では、通常は手動操作モード 1 と同様に、オペレータがジョイスティックを用いてエージェントに指令を与え、ロボット群を操作する。ロボット群が移動途中で障害物などに遭遇した場合には、計算機がそれぞれのロボットの車輪速度を自動調整し、障害物に衝突しないようにコントロールする。オペレータは点在する障害物の回避に気をとられることなく目標に向けた移動作業に集中できる。これにより、手動操作におけるオペレータの負担をさらに軽減することができる。

以上のように、オペレータが状況に応じて操作モードを切り替えることで、自律操作では対応することができない状況でも、手動操作に切り替えることにより柔軟に対応することができる。また、手動操作をする場合、エージェントの操作支援により、オペレータにとって操作しにくい状況でも容易に操作することが可能となる。

3. ロボット群の制御

3. 1 ロボット群の動作

本研究では複数のロボットの操作を対象と考え、3 台のロボットを用いて移動制御を行った。3 台のロボットは 1 つの群となり目標追従を行う。ロボット群の操作を行いやすくするため、図 2 のようにロボット群の中の 1 台をリーダーロボットとし、ロボット群の先頭に位置づける。ロボット群の中心座標 (P_x, P_y) を (1), (2) 式を用いて求め、それをロボット群の座標とする。 h はロボット群の中心からの半径、 α はロボット群の中心とリーダーロボットとの角度を示す。ロボット R とロボット L は、リーダーロボットの現在位置をもとに目標位置を算出し、隊形を維持しながら移動を行う。また群の半径 h は、通常一定の大きさを保つようにしている。

$$P_x = G_x - h \cdot \cos(\alpha) \tag{1}$$

$$P_y = G_y - h \cdot \sin(\alpha) \tag{2}$$

3. 2 ロボット群の隊形

通常のロボットの隊形は、正三角形の形を基本とする。ロボット群が目標地点へ到達するまでに、障害物と障害物の間を通るなど、狭い場所を通る場合には基本隊形では目標地点へ到達することができない。そのような場合には、ロボット群は障害物を回避するために基本隊形を変更することが必要になる。

本研究では正三角形の隊形を基本隊形とし、状況に応じてロボット群の径を伸縮することで隊形を変更する。ロボット群が基本隊形のまま障害物を回避できる場合は、群の径は変化させず障害物を回避する。狭い道を走行する場合など、基本隊形のままでは左右のロボットが障害物に衝突してしまう場合は、図 3 に示すようにロボット群の半径 h を調整することにより回避する。障害物を回避したと判断した地点で基本隊形に再び戻し、目標地点へ向かって移動する。

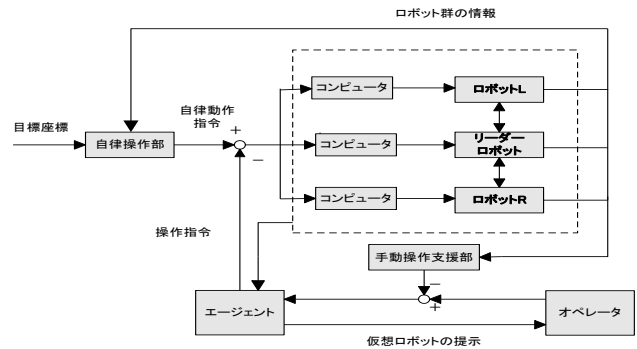


図 1. システムの構成

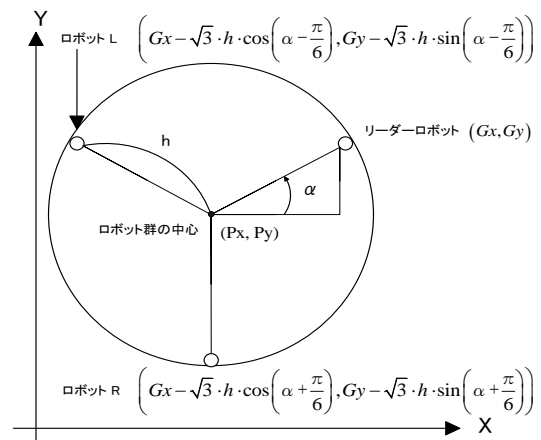


図 2. ロボットの配置

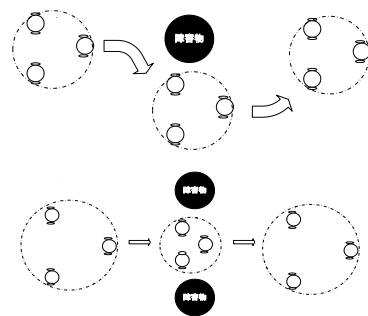


図 3. ロボット群の障害物回避

4. 計算機自律操作部

4. 1 位置検出法

図 4 は移動ロボットの概形と移動平面で、右車輪の回転速度を V_R 、左車輪の回転速度を 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、

$$V = \frac{V_R + V_L}{2} \tag{3}$$

$$\omega = \frac{V_R - V_L}{2d} \tag{4}$$

となる．ロボットの位置の一般化座標 (Gx, Gy) と，車体中心の角速度とロボットの進行角 θ の関係を離散時間系で表すと以下の様になる．ここで， k は時点， Δt はサンプル時間を示す．

$$Gx(k+1) = Gx(k) + V \cdot \cos \theta \cdot \Delta t \quad (5)$$

$$Gy(k+1) = Gy(k) + V \cdot \sin \theta \cdot \Delta t \quad (6)$$

$$\theta(k+1) = \theta(k) + \omega \cdot \Delta t \quad (7)$$

また，目標地点の座標を (x, y) とすると，ロボットから見た目標地点への角度 ϕ は次の式により求めることができる．

$$\phi(k) = \tan^{-1} \left(\frac{y - Gy(k)}{x - Gx(k)} \right) \quad (8)$$

移動ロボットにはセンサを取り付け，障害物を検知すると，障害物までの距離 r_0 と角度 θ_0 を計測できるようになっている．

4. 2 目標位置追従

4. 2. 1 車輪速度の決定

自律操作モードでは，後件部メンバーシップ関数をシングルトンとする簡略ファジィ推論を用いて車輪の速度修正量 dv を決定する．目標地点までの距離を 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．

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

A_i, B_i はファジィ集合， C_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．

ロボットの左右車輪速度は

$$V_R = V_R + dv \quad (9)$$

$$V_L = V_L + dv \quad (10)$$

となる．

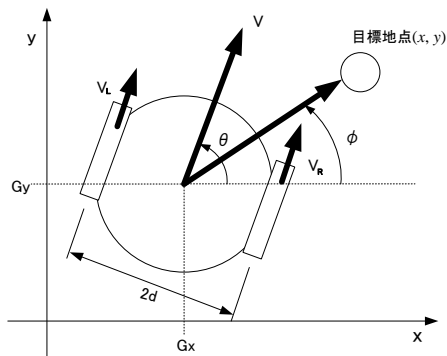


図 4. 移動ロボットの概形

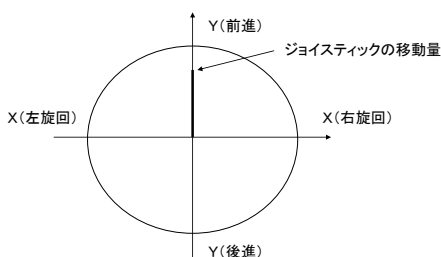


図 5. ジョイスティック操作

4. 2. 2 進行方向の決定

自律操作モードでは，ロボットが目標地点に向かうようにロボットの進行方向を自律的に決定する．目標地点とロボットの角度 ϕ とロボットの進行角 θ との差 $\varepsilon = \phi - \theta$ と，角速度 ω を入力とし，次のようにルール化し，角速度修正量 $d\omega$ をファジィ推論により求める．

IF ω is A_i AND ε is B_i THEN $d\omega$ is C_i

・ $d\omega \geq 0$ のとき，左旋回する．そのための右車輪速度を次式により決定した．

$$V_R = V_R + d\omega \quad (11)$$

・ $d\omega < 0$ のとき，右旋回する．そのための左車輪速度を次式により決定した．

$$V_L = V_L - d\omega \quad (12)$$

4. 3 障害物回避

自律操作モードでは，障害物を回避するときには，目標角の変更，速度の変更を自律的に行う．また，状況に応じてロボット群の隊形を変形させたり，群径を伸縮させることで障害物を回避することができる．

センサが障害物を検知すると，ロボットに目標角変更指令が与えられる．目標角の変更はファジィ推論を用いて行う．障害物との距離 r_0 と角度 θ_0 を用いて，次のルールにより目標角修正量 $d\theta$ を求める．

IF r is A_i AND θ is B_i THEN $d\theta$ is C_i

$\theta_0 - \theta \geq 0$ の場合，障害物はロボットの左側にあるので，目標角を次のように修正する．

$$\phi = \phi - d\theta \quad (13)$$

$\theta_0 - \theta < 0$ の場合，障害物はロボットの右側にあることになるので，目標角を次のように修正する．

$$\phi = \phi + d\theta \quad (14)$$

障害物を回避するとき速度が速いと回避しにくい．そこで，障害物をより回避しやすくするために，障害物との距離が近くなるほど速度が小さくなるようにした．障害物との距離からゲイン k を求め，次式のようにゲインをロボットの速度にかけることで速度を調整している．

$$V_R = k \cdot V_R \quad (15)$$

$$V_L = k \cdot V_L \quad (16)$$

k は障害物との距離により 0.2 から 1 の間で変化するように設定した．

5. 手動操作支援システム

5. 1 手動操作モード 1

手動操作モードでは，オペレータはエージェントから提示された仮想ロボットを見ながら，ジョイスティックを用いてエージェントに指令を与える．指令を受け取ったエージェントは，車輪速度指令をそれぞれのロボットへ分配する．ジョイスティックの Y 軸方向成分が 0 のとき，ジョイスティックを右に倒すとロボット群は右旋回し，左に倒すと左旋回する．また，x 方向成分が 0 のときにジョイスティックを奥に倒すと前進し，手前に引くと後進する．ロボット群の速度はジョイスティックの移動量に比例する．

エージェントの指令分配を以下のように行った．

J_x はジョイスティックの入力の X 方向成分， J_y は Y 方向成分． V_{cR}, V_{cL} はリーダーロボットの左右車輪速度． V_{rR}, V_{rL} はロボット R の左右車輪速度． V_{lR}, V_{lL} は

ロボット L の左右車輪速度である。

前進, 後進する場合は, 3 体のロボットの左右車輪速度を同じにする。

$$V_{c_R} = V_{c_L} = V_{r_R} = V_{r_L} = V_{l_R} = V_{l_L} = Jy \quad (17)$$

旋回する場合には Jx に重みを掛けることで車輪速度を決定している。このとき用いた重みは, 群の隊形が維持できるように実験により算出した。

右旋回する場合は, リーダーロボットは右前方に移動する。

$$V_{c_R} = 0.6 \cdot Jx \quad (18)$$

$$V_{c_L} = Jx \quad (19)$$

ロボット R はその場で右を向く。

$$V_{r_R} = 0 \quad (20)$$

$$V_{r_L} = 0.4 \cdot Jx \quad (21)$$

ロボット L は右前方に大きく移動する。

$$V_{l_R} = Jx \quad (22)$$

$$V_{l_L} = 1.4 \cdot Jx \quad (23)$$

左旋回する場合は右旋回する時の逆である。

5. 2 手動操作モード 2

進行方向に障害物がある場合にはエージェントがオペレータの操作を支援する手動操作支援システムを加える。進行方向に障害物がある場合には, エージェントがオペレータの与えるロボットの車輪速度を調整し, 障害物を回避できる方向へロボット群の進行方向を変更させる。このようにすることで, オペレータは点在する障害物をあまり気にすることなく目標への群の移動操作を行うことができる。

本システムでは, 図 6 に示すように障害物からの距離 r_o と障害物との角度 θ_o を次のようにルール化し, 車輪速度修正量 dv をファジィ推論により求める。

IF r_o is A_i AND θ_o is B_j THEN dv is C_k

A_i, B_j はファジィ集合, C_k 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。

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, ロボットの右車輪速度 V_R と, 左車輪速度 V_L は次のようになる。

・障害物がロボット群の左側にある時

$$V_R = V_R' \quad (24)$$

$$V_L = V_L' + dv \quad (25)$$

・障害物がロボット群の右側にある時

$$V_R = V_R' + dv \quad (26)$$

$$V_L = V_L' \quad (27)$$

6. シミュレーション実験

6. 1 実験システム

コンピュータ上に 3 体の移動ロボットを用意し, 本論文で提案する制御システムを構成し, シミュレーション実験を行った。シミュレーションで用いたロボットは 3 体とも, 直径 6 [cm] の独立 2 輪駆動の移動ロボットである。

6. 2 自律操作による障害物回避

ロボット群が目標地点へ自律走行する途中に, 障害物と障害物の間の狭い道を走行する場合を想定した。

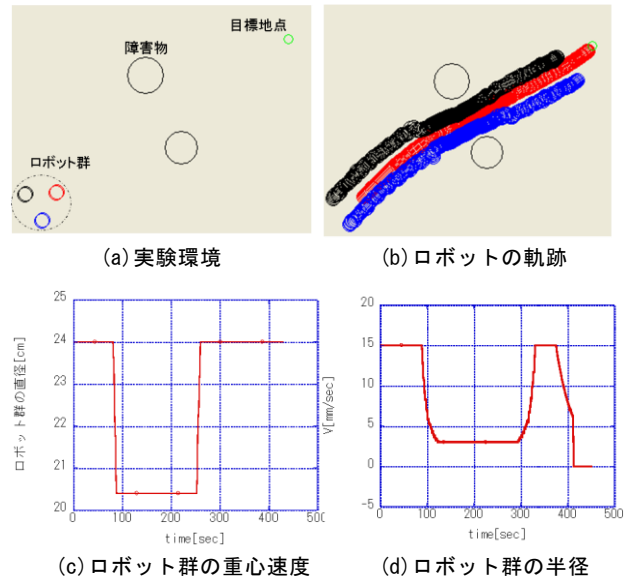


図 6. 自律操作による障害物回避

図 6 (a) に示す環境において, 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 6 (a) の丸は障害物であり, 点線の円はロボット群を表している。

図 6 (b) 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各ロボットの軌跡を表しており, 図 6 (c) はロボット群の重心の速度, 図 6 (d) はロボット群の半径の変化を示している。

スタートした時点での隊形の大きさでは, 障害物の間を通行することができないので, 計算機が図 6 (d) のように, 約 80 [sec] の時にロボット群の半径を 24 [cm] から 20.4 [cm] に変更し, 障害物を回避している。そして, 約 250 [sec] の時に再び群の半径を元に戻し, 目標地点へ向かって走行している。図 6 (c) からわかるように, 障害物に接近した時にはロボット群の速度を落としており, 安全に障害物を回避でき, 目標地点に到達することができた。

6. 3 手動操作による障害物回避

ロボット群が目標地点へ自律走行する途中に, センサでは検出できない障害物が発生した場合, そのままだとロボット群は障害物に衝突してしまう。このような場合を想定し, 人間が操作することにより障害物を回避するシミュレーションを行った。

実験環境を図 7 (a) に示す。図の黒い丸はセンサで検出できない障害物を表している。オペレータはジョイスティックを操作してエージェントに指令を送り, 指令を受けたエージェントが各ロボットに速度指令を分配することで, 障害物を回避し目標地点へと到達させる。図 7 (b) はロボットが走行した軌跡である。このようにロボット群の隊形を維持したまま障害物を回避することができた。図 7 (c) はロボット群の重心の速度のグラフである。オペレータがジョイスティックを操作することにより, ロボットの車輪速度は調整されている。以上のように, センサで検出することのできない障害物にも衝突することなく, 目標地点に到達することができた。

6. 4 手動操作支援

このシミュレーションは、環境に障害物が点在する中でオペレータが手動操作を行う場合を想定している。実験環境を図 8 (a)に示す。図 8 (b) はロボットの移動平面上の軌跡である。

オペレータは手動操作によりロボット群が前進するように指令を与える。センサが進行方向に障害物を検知すると、計算機が人間の操作に介入し、図 8 (d) (e)のように左右車輪速度を修正することで、進行方向を変更して障害物を回避する。障害物を回避すると、計算機は再び目標地点へ向かうように車輪速度を修正する。図 8 (c)からわかるように、オペレータは前進の指令のみを与えている。

以上のように、計算機がオペレータの操作を支援することで障害物を回避し、目標地点に到達することができた。

6. 5 手動操作と自律操作の融合

以上のシステムを組み合わせた総合実験を行った。なお、スタート時は手動操作モード 2 としている。状況に応じてオペレータが自律操作モード、手動操作モード 1 に切り替えて対応し、途中にある障害物を回避して目標地点に到着するようにした。

図 9 (a)に実験環境を示す。図 9 (b)はロボットの移動平面上的軌跡である。図 9 (c)は、ロボット群の重心の速度を示す。図 9 (d)に示す自律操作フラグが 0 の時は手動操作モードの状態を表し、自律操作フラグが 1 の時は、自律操作モードの状態を表している。図 9 (e) (f)に各ロボットの X 座標、Y 座標の変化を示す。なおここでは、図 9 (b)に示すように移動平面の左上を座標原点としている。

スタート時は、オペレータが手動操作モード 2 によりロボット群を目標地点へ向けて走行させている。一番初めに検知された障害物は、図 9 (c) より約 25[sec]の時に計算機の支援により、ロボットの車輪速度を修正して障害物を回避していることがわかる。また、オペレータは次の障害物に接近した時に自律操作モードに切り替えることで、自律でロボット群の隊形を調整し障害物を回避させた。自律操作モードは約 120[sec]から約 280[sec]までの間で行い、障害物を回避させた後、手動操作モード 1 に切り替えてロボット群を目標地点に到達させた。

以上のように、オペレータが状況に応じて操作モードを切り替えることで、入り組んだ環境でも容易に障害物を回避し、作業を行うことができた。

7. おわりに

本研究では、複数のロボットの移動操作を対象とし、人間と計算機の協調操作システムを構築した。

本システムでは、通常ロボット群は、計算機の自律操作により、障害物を回避して目標地点へ向け移動する。移動途中、基本隊形では通行できない狭い道を走行する場合には、群の径を自律で調整することで対応する。

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などの場合には、人間はその状況に合わせて、自律操作から手動操作に切り替えて、その状況に対応する。

本システムでは人間がロボット群を操作する際に支援するエージェントを付加している。

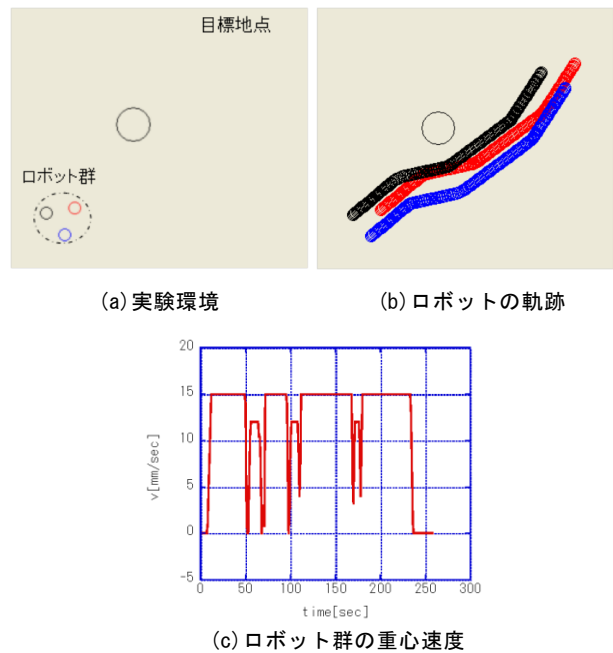


図 7. 手動操作による障害物回避

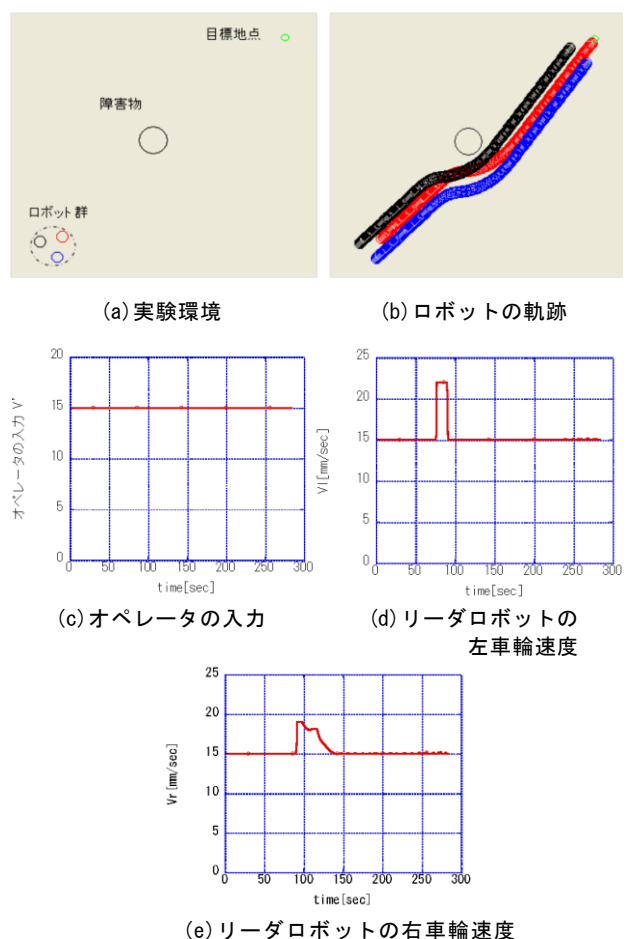


図 8. 手動操作支援

手動操作においては、オペレータはそれぞれ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る。エージェントはオペレータからの指令を受け、各ロボットの速度を求めそれぞれのロボットに指令を分配する。そのため、オペレータの負担が軽減される。さらに、オペレータが手動操作を行う場合に支援エージェントが障害物を回避するようにロボット群の進行方向を修正することで、障害物が点在する複雑な環境にもオペレータは簡単に対応することができる。

3 台のロボットを用いてシミュレーション実験を行った結果、人間と計算機の操作により、状況に応じて隊形を変更し、未知な障害物にも衝突することなく目標地点まで到達することで、本システムの有効性を確認した。

本システムは、複数のロボットを人間と計算機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においても柔軟に対応することで、作業を効率よく行うことが可能になると考えられる。

参考文献

- (1) 鷲沢: 極限作業プロジェクト, 日本ロボット学会誌, 9-5, 614/618 (1991)
- (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, 資源工学学会誌, Vol. 52, No. 4, 215/218 (2005)
- (3) 平井: Shared Autonomy の理論, 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 6, 788/793 (1993)
- (4) Thomas B. Sheridan: Telerobotics Automation and Human Supervisory Control, The MIT Press, 13/25 (1992)
- (5) 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)
- (6) 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集, Vol. 42, No. 8, 877/883 (2006)
- (7) 檜田, 岡崎, 小池: LAN を用いた走行ロボット Khepera のジョイスティック制御について, 高専教育, 24 号, 103/108 (2001)
- (8) 長田: 自律分散をめざすロボットシステム, オーム社, 1/14, 31/54, 75/90 (1995)
- (9) 宮崎, 升谷, 西川: ロボティクス入門, 共立出版株式会社 (2000)

(2011 年 11 月 7 日 受理)

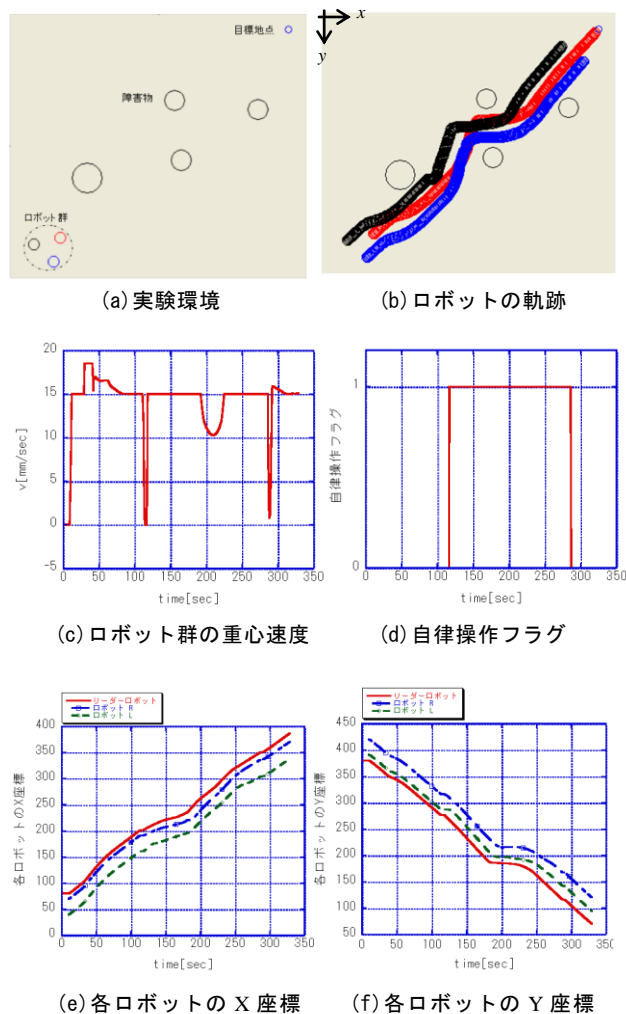


図 9. 融合操作