

# 人の動特性とロボットの混雑を考慮した人工ポテンシャル法の提案

星野 智史 (宇都宮大学), 牧 幸一郎 (宇都宮大学)

## Artificial Potential for Human Behavior and Robot Congestion

Satoshi HOSHINO (Utsunomiya Univ.), and Koichiro MAKI (Utsunomiya Univ.)

**Abstract:** Service robots for cleaning, guiding, and transporting are, in these days, being used in our living environment. In order for the robots to exist together with human, therefore, it is necessary to ensure the human safety. On the other hand, ensuring the safety might decrease the working efficiency of robots. Namely, this is a trade-off problem between the safety and efficiency for the human-robot interaction. For this problem, we describe a novel a coordination technique for multiple mobile robots. Two artificial potentials are presented in this paper. First potential field is provided with the use of Von-Mises distribution for the human behavior, such as moving direction and velocity, in addition to the relative distance. Second potential field is provided on the basis of kernel density estimation for robot congestion. Through simulation experiments, finally, the effectiveness of the presented potentials for robots motion planning is shown.

**Keywords:** Multi-robot systems, Coordination, Motion planning, Artificial potential method, Human-robot interaction

### 1 緒言

工場における無人の搬送車, 障がい者に対する自律移動車椅子, 病院や介護施設における看護・介護ロボット, オフィスでの清掃ロボット等, 人の作業代替や助けとなるロボットが活躍している. このようなロボットシステムでは, 人への安全性を第一に考慮した上で, ロボットによる作業の効率化がなされなくてはならない. そこで本研究では, 複数台の車輪型移動ロボットによって構成されるシステムを想定し, 安全性と効率性の両方を満たすためのロボット群制御法について述べる.

本システムにおいてロボットは, 環境中に存在する人との衝突を回避しながら, かつ, 作業遂行のため目的地に移動するための動作計画を行わなくてはならない. そのためにはまず, 環境におけるロボットの作業空間を構造化する必要がある. そこで, 人工ポテンシャル法 [1] を適用する. 本手法は, 空間全体を引力と斥力の加重ポテンシャルで定義することにより, 一台だけでなく複数台ロボットの隊列制御などにも適用することができる [2].

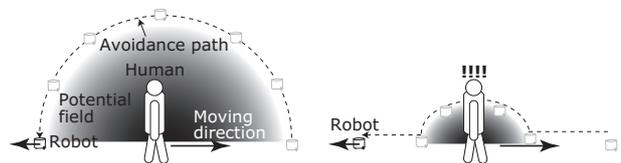
ロボットは, 目的地で最小値となる引力ポテンシャル場の勾配ベクトルに基づき動作する. これにより, 目的地に向けて移動する. 障害物に対しては, 斥力ポテンシャル場における勾配ベクトルに基づき動作する. これにより, 障害物との衝突を回避する. このとき, ロボットに斥力を作用させるため, 障害物の周囲に対して一様なポテンシャルが生成される. 障害物が環境に固定された静的なものであれば十分であるが, 人のように動的な障害物の場合, その向きや速度によっては, 安全性を確保できない恐れがある.

上記の動的障害物に対しても安全性を確保するためには, 障害物からの斥力ポテンシャルを大きく生成する必要がある. これにより, 人がロボットより速い速度で向かってきたとしても, ロボットが人に対して衝突を回避することが可能となる. しかしながらこのアプローチでは, 人の安全性を確保した分, 周囲のロボットが斥力ポテンシャルの影響を遠くから受けてしまい, 作業の効率

性を低下させてしまうトレードオフ問題を生じる.

### 2 安全性と効率性に関するチャレンジ

Fig.1 に, トレードオフの関係にある人の安全性とロボット作業の効率性を示す. 人への安全性を高めるため, 大きなポテンシャルに基づき回避動作をとると, 移動に要する時間や経路長の観点から, ロボットの作業効率低下を招いてしまう (Fig.1(a) 参照). 一方で, 作業効率を優先するため, ロボットが小さなポテンシャルに基づき必要最低限の回避動作をとると, 人やその動きの変化による衝突の危険度が増してしまい, 安全性を確保することが困難になってしまう (Fig.1(b) 参照).



(a) High safety vs. low efficiency (b) Low safety vs. high efficiency

Fig. 1 Trade-off Problem between Safety and Efficiency

さらに, Fig.2 が示すように, 全てのロボットが人からの斥力ポテンシャルに基づき回避動作をとると, 同様の方向に移動してしまい, その結果, ロボットによる混雑が発生してしまう可能性がある. この混雑エリアに別の人が進入してくると, 2つの斥力ポテンシャルと混雑により, ロボットは身動きをとれなくなる. そして, 人に対する衝突回避が不可能となり, 安全性が確保できなくなってしまう. また, このような混雑状況では, ロボットによる作業効率そのものも低下してしまう.

そこで本研究では, 人工ポテンシャル法を適用した際のこれらチャレンジングポイントを解決するため, 障害物としての人の位置に加え動特性をも考慮した新たな斥力ポテンシャルを提案する. また, ロボットが障害物

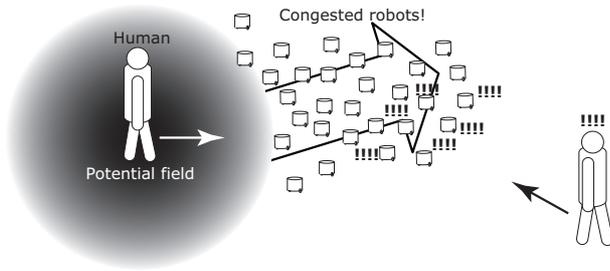


Fig. 2 Robot Congestion Caused by Repulsive Potential

を回避する際に一極集中してしまわないよう、混雑を緩和するための斥力ポテンシャルも提案する．そして、シミュレーション実験を行い、各ポテンシャルの有効性を示す．さらに、これらを加重した斥力ポテンシャルに関しても、ロボット群制御に向けた動作計画法としての有効性について論じる．

### 3 人工ポテンシャル法

#### 3.1 ポテンシャル場

式 (1) に、人工ポテンシャル法の基本モデルを示す．目的地  $x_d$  に対して、引力ポテンシャル  $U_{x_d}$  に基づき動作を計画し、移動経路上とその付近の障害物  $o$  に対して、斥力ポテンシャル  $U_o$  に基づき回避動作を計画する．引力ならびに斥力ポテンシャルの加重和で構成されるポテンシャル場に基づき、ロボットは逐次的に動作計画を繰り返すことで、衝突を回避しながら目的地に移動する．

$$U = U_{x_d} + U_o \quad (1)$$

弾性力による位置エネルギーに基づき引力ポテンシャル  $U_{x_d}$  を生成した場合、 $U_{x_d}$  がロボットから目的地までの距離の 2 乗に比例して増大する．これでは、目的地から離れた位置に存在するロボットに対して大きな引力が作用してしまい、障害物との衝突を回避できない恐れがある．そこで本研究では、重力による位置エネルギーを参考に、式 (2) に基づき引力ポテンシャルを生成する．

$$U_{x_d}(x) = k_p(x - x_d) \quad (2)$$

ただし、 $k_p$  は比例乗数、 $x$  と  $x_d$  はそれぞれロボットと目的地の位置である．すなわち、ロボットと目的地の相対距離に関係なく一定の引力  $k_p$  が式 (3) によってロボットに作用し、これにより目的地まで移動する．

$$\mathbf{F}_{x_d} = -\nabla U_{x_d} = -k_p \quad (3)$$

障害物との衝突回避については、ロボットと障害物の相対的な位置関係に基づき、例えば文献 [1] では、式 (4) に示す斥力ポテンシャル  $U_o$  が与えられてきた．

$$U_o(x) = \frac{1}{2}\eta \left( \frac{1}{\rho(x)} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 \quad (4)$$

ただし、 $\rho(x) \leq \rho_0$  である．また、 $\eta$  は比例乗数、 $\rho(x)$  はロボットの位置  $x$  から障害物  $o$  までの距離、 $\rho_0$  は距離に関する閾値のことである．すなわち、ロボットがある閾値距離  $\rho_0$  以内の距離  $\rho(x)$  に達したら、障害物付近に存在するものとみなし、そこから遠ざける斥力が式 (5) によってロボットに作用することを意味している．

$$\mathbf{F}_o(x) = -\nabla U_o = \eta \left( \frac{1}{\rho(x)} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{1}{\rho^2(x)} \nabla \rho(x) \quad (5)$$

#### 3.2 問題提起

従来の人工ポテンシャル法では主に、障害物に対して、その周囲一定の範囲で斥力が作用するポテンシャルが生成されてきた．これにより、モデルの上ではロボットによる障害物との衝突回避が可能となる．しかしながら、実際にはロボットの速度には上限がある．また、安全性と効率性の観点より、動的な障害物に対して、一様な方向へポテンシャルを生成することは合理的でない．すなわち、移動方向や速度といった動特性を考慮し、それらに応じた形状の斥力ポテンシャル  $U_{o_h}$  が必要となる．

本ロボットシステムでは、各ロボットに  $u_{o_r}$  の斥力ポテンシャルを生成することで、ロボット間での衝突を回避することができる．しかしながら、ロボット群全体の斥力ポテンシャルは  $U_{o_r} = \sum u_{o_r}$  となり、ポテンシャル場にて極大値をロボットの台数だけ持つ多峰性となる．これに基づきロボットが動作すると、別の峰からの勾配ベクトルに従って動作するロボットと混雑を形成してしまう．これは、 $U_{o_h}$  に基づき人との衝突を回避する際にも同様の問題となる．そのため、大域的にロボット間で整合性のとれた動作を実現するためには、単峰性の斥力ポテンシャル  $U_{o_r}$  が必要となる．

#### 3.3 ポテンシャル生成アプローチ

そこで本研究では、以下のアプローチにより、人およびロボット群に対する斥力ポテンシャルを生成する．

- 障害物の動特性をフォン・ミーゼス分布によりモデル化
- ロボット群全体の混雑度をカーネル密度推定法によりモデル化

フォン・ミーゼス分布では、動的障害物である人の移動方向や速度をパラメータとして、その人が向かう先を予測し、存在確率を密度関数として表現することができる．これにより、障害物に対する動特性ポテンシャル  $U_{o_h}$  を生成する．一方カーネル密度推定法では、各ロボットの存在確率の密度関数からロボット群全体の混雑度をガウス分布として表現することができる．これにより、多峰性のポテンシャルから単峰性の混雑緩和ポテンシャル  $U_{o_r}$  を生成する．そしてこれらの加重和  $U_{o_h} + U_{o_r}$  が、

人の動特性とロボットの混雑を考慮した斥力ポテンシャル  $U_o$  となる。

なお本研究では、人工ポテンシャル法において従来より問題とされてきたロボットのトラップ、すなわち、凹型の静的障害物に対する停留問題およびポテンシャル場におけるローカルミニマ問題は扱わない。ただし、後者の問題に対しては、人と他のロボットの存在により斥力ポテンシャルが動的に変化するため、ロボットが特定の場所で停止し続けることは減少する。

## 4 障害物の動特性ポテンシャル

### 4.1 関連研究

障害物の周囲一定の範囲に斥力ポテンシャルが生成されると、2章で述べたトレードオフに加え、その大きさ次第ではロボットの移動経路が阻害されたり、最悪、目的地に到達できない場合がある。この問題に対して、斥力ポテンシャルの形状を変形させる方法が提案されている [3]。しかしながら、障害物は静的なもの対象とされており、ロボット、障害物、目的地の位置関係に基づいてポテンシャルの形状が変化されているのみである。

動的障害物を対象とし、位置に加え、移動方向と速度を考慮した斥力ポテンシャルにより、ロボットの動作計画を行っている研究もある [4][5]。ただし、式 (4) が示す従来のポテンシャルと同様、斥力は一定の範囲内のみ作用するものと限定されている。ロボットによる歩行者への追従と衝突回避を目的に、レナード・ジョーンズポテンシャルを歩行者の移動方向に対して Wrapped normal 分布に基づき重み付けする手法も提案されている [6]。しかしながら、動的障害物の速度は考慮されていない。

### 4.2 動特性ポテンシャル

そこで、位置に加え、障害物の動特性として移動方向とその速度を考慮する。さらに、障害物からの距離に閾値を設けることなく、動特性に基づいた存在確率を密度関数として定義するため、本研究では、フォン・ミーゼス分布に基づき式 (6) が示す斥力ポテンシャルを生成する。

$$U_{o_h}(r, \theta) = \sum_{i=1}^n \frac{\exp[\kappa \cos(\theta_i - \mu_i)]}{2\pi I_0(\kappa)} \alpha_h \frac{\exp\left[-\frac{r_i}{2\sigma}\right]}{2\pi\sigma} \beta |v_i| \quad (6)$$

ここで、 $r$  は  $n$  人とロボットの距離、 $\theta$  はそれらの相対角度、 $\mu$  は人の移動方向、 $\kappa$  は人の移動方向に関する平均方向母数、 $\sigma$  は動径方向に対する分散量、 $\alpha_h$  はその係数、 $\beta$  は速度  $v$  に関する係数である。

これによりロボットは、障害物に対して、相対的な位置ならびに速度、そしてその方向との関係からポテン

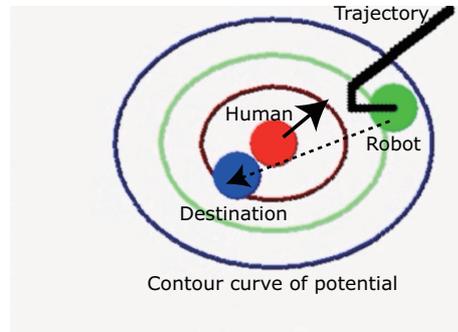
シャル場を定義することが可能となる。しがたって、動的障害物を回避するよう式 (7) の斥力が作用する。

$$F_{o_h} = -\nabla U_{o_h} = \sum_{i=1}^n \frac{-\alpha_h \beta |v_i|}{4\pi^2 \sigma I_0(\kappa)} \exp\left[\kappa \cos(\theta_i - \mu_i) - \frac{r_i}{2\sigma}\right] J_{o_h} \quad (7)$$

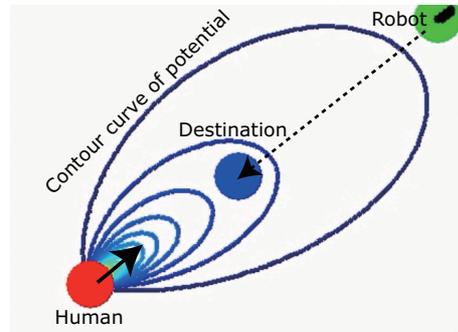
ただし、 $J_{o_h}$  は式 (8) が示すヤコビ行列のことである。

$$J_{o_h} = \begin{bmatrix} -\frac{\cos \theta}{2\sigma} + \frac{\kappa \sin \theta \sin(\theta - \mu)}{r} \\ \frac{\sin \theta}{2\sigma} - \frac{\kappa \cos \theta \sin(\theta - \mu)}{r} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Fig.3 では、目的地へ移動中のロボットが、動的障害物としての人を異なる斥力ポテンシャルに基づき回避している。ロボットは、引力によって目的地に向け動作し、人からの斥力ポテンシャルが影響する地点から、斥力による回避動作をとる。なお、ポテンシャル場における斥力が同じ点を結び、それらを等高線として示している。



(a) Normal potential



(b) Behavior potential

Fig. 3 Repulsive Potential Field for Movable Obstacle

Fig.3(a) では、 $U_{o_h}(r) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right]$  の二次元正規分布に基づき、距離のみを考慮した斥力ポテンシャルが人を中心に生成されている。このとき、離れた位置にいるロボットに斥力は作用するものの、その影響が目的地からの引力に及ばず、人と距離が近づいたところで回避動作をとる。また、人の背後にロボットがいた場合、本来不必要な斥力が作用することとなる。一方 Fig.3(b) では、式 (6) により、人の移動方向に対して速度に応じ

た斥力ポテンシャルが生成されている．これにより，ロボットは，速度の速い障害物（人）に対しては遠くから，遅い障害物（人）に対しては近くにて回避動作をとることが可能となる．また，人の背後にいるロボットは，その影響を受けることなく作業をすることができる．

## 5 ロボットの混雑緩和ポテンシャル

### 5.1 関連研究

著者らは，直線上を移動するロボットの走行制御に関する研究を行ってきた（例えば [7]）．その結果，速度制御により渋滞が解決されることを示した．しかしながら，二次元平面上を移動するロボットは，速度制御以外にも，移動方向によって渋滞を緩和することが可能である．

そこで，各ロボットが周りのロボットの台数から混雑領域を認識し，そこを迂回するよう動作することで混雑を緩和する制御手法が提案されている [8]．しかしながら，これでは局所的な混雑緩和にしかならず，他のロボットも同じような迂回動作をとれば，別の場所に混雑が発生してしまう可能性もある．すなわち，混雑緩和に向けては，大域的なロボット群の混雑度に基づいた整合性の高い動きが求められる．

そこで，空間全体をセルに分割し，各セルにおける人の有無からセル・オートマトン法により歩行者の離散的な混雑度を求める研究がなされている [9]．単純なモデルにより混雑度が求められる一方で，その精度はセルに依存してしまい，正確な混雑度を求めることが困難となる．ロボットや人の連続的な流れに着目し，それらを流体力学における非圧縮性あるいは圧縮性のニュートン粒子とみなした混雑のモデル化に関する研究も行われている [10][11]．これにより，粒子の密度によって大域的な混雑度が評価された．しかしながら，流体モデルでは計算コストが膨大になってしまう．

### 5.2 混雑緩和ポテンシャル

そこで本研究では，カーネル密度推定法により，各ロボットの位置から大域的なロボット群全体の混雑度を見積もる．これにより，式 (9) に示す単峰性の斥力ポテンシャルが生成される．ロボットは，ポテンシャル場での自身の位置から，混雑度を求めることができる．

$$U_{or}(r) = \frac{\alpha_r}{nb^2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\pi} \exp\left[-\frac{r_i^2}{2b^2}\right] \quad (9)$$

ここで， $r$  はロボット間距離， $n$  はロボットの台数， $\alpha_r$  は係数， $b$  はバンド幅（平滑化パラメータ）のことである．

したがってロボットは，単峰性の斥力ポテンシャルにより大域的に整合性のとれた，すなわち空間を一様に占

有するよう動作し，その結果混雑を緩和することが可能となる．そのため，式 (9) のポテンシャル場に存在するロボットに対して，式 (10) の斥力が作用する．

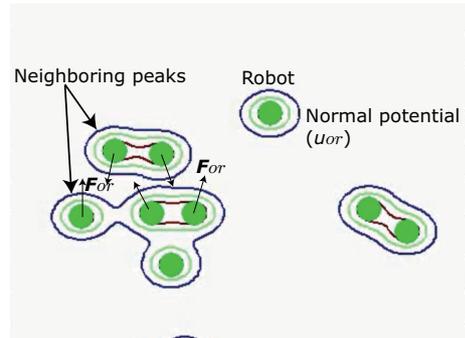
$$\mathbf{F}_{or} = -\nabla U_{or} = \frac{\alpha_r \mathbf{J}_{or}}{2\pi nb^2} \sum_{i=1}^n \frac{r_i}{b^2} \exp\left[-\frac{r_i^2}{2b^2}\right] \quad (10)$$

ただし， $\mathbf{J}_{or}$  はロボット間の相対的な角度  $\theta$  に基づいた式 (11) が示すヤコビ行列のことである．

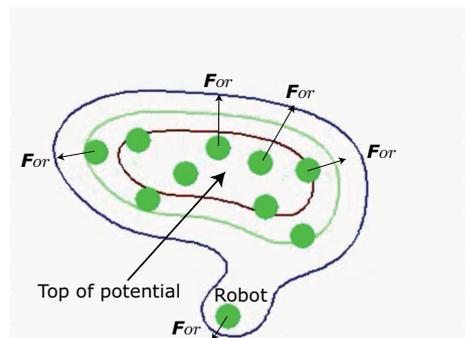
$$\mathbf{J}_{or} = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \quad (11)$$

Fig.4 に，ロボットの混雑に対して斥力ポテンシャルが生成されている様子を示す．なお，説明の都合上等高線が描かれているが，空間全体の混雑度を計算する必要はない．本研究では，ロボットの性能は均一なものとし，速度に関する動特性は人に比べ十分に小さいものと仮定する．そのため，ロボット間の衝突回避には，位置関係のみから二次元正規分布に基づいた斥力ポテンシャル

$$u_{or}(r) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right] \text{ を用いる．}$$



(a) Multiple peaks of reduplicated normal potentials  $u_{or}$ .



(b) Single peak of globally estimated congestion potential  $U_{or}$ .

Fig. 4 Repulsive Potential Field for Robot Congestion

Fig.4(a) では，各ロボットに与えられた  $u_{or}$  が  $\sum u_{or}$  によって加重され，多峰性の斥力ポテンシャルが生成されている．これによりロボットは，異なった峰からの勾配ベクトルに従って動作する．そのため，二つの峰が隣

接するポテンシャル場では，ロボットが谷間で新たな混雑を形成してしまう．一方 Fig.4(b) では，式 (9) により，ロボット群全体としての混雑度が単峰性の斥力ポテンシャルとして生成されている．これにより各ロボットは，自身の位置における混雑度に基づき，一つの頂点から勾配ベクトルに従って動作する．そのため，混雑緩和に向け，大域的に整合性の取れた動作計画が可能となる．

## 6 シミュレーション実験

### 6.1 実験条件

本実験において対象とする環境を Fig.5 に示す．Fig.5(a) では，2 台のロボット ( $R_1$  と  $R_2$ ) がそれぞれの目的地 ( $G_1$  と  $G_2$ ) を往復移動する．Fig.5(b) では，6 台のロボットが投入される．ロボット  $R_i$  と  $R_j$  は，2 つの目的地 ( $G_{ij}$  と  $G_{ji}$ ) を往復移動する．いずれも人間が三人，ランダムに決められた目的地へ直進移動する．

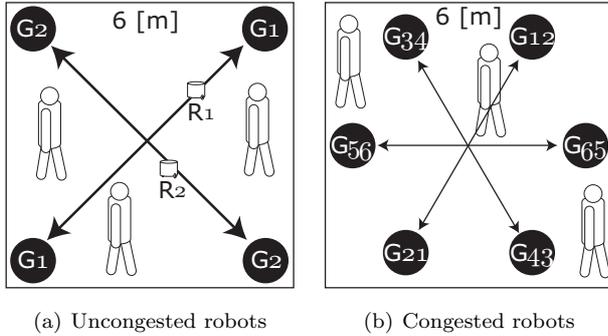


Fig. 5 Environment: Three Humans and Two/Six Robots

人との衝突を回避するため， $U_{oh}$  として，式 (6) の動特性ポテンシャルを生成する．この他比較のため，二次元正規分布のポテンシャル，および，Social Force ポテンシャル [12] を用いる．ロボット同士の衝突を回避するため， $U_{or}$  として各ロボットには二次元正規分布のポテンシャルを用いるが，さらに，カーネル密度推定法により式 (9) の混雑緩和ポテンシャルを生成する．

なお，人の移動は  $0.8$  [m/s]，ロボットは全方向移動可能で  $0.4$  [m/s] を最高速度とする．式 (6) と式 (9) における諸パラメータは， $\mu = v/|v|$ ， $\kappa = 5.0$ ， $\sigma = 1.5$ ， $\alpha_h = 10000$ ， $\beta = 1.0$ ， $\alpha_r = 2000$ ， $b = 4.0$  とした．

### 6.2 実験結果

シミュレーション実験を 5 回行い，ロボットがゴールに合計 100 回到達するまでに要した時間，ならびにそのときの人～ロボット間での衝突回数の平均値を Table 1 と Table 2 に示す．なお，NP は Normal Potential，SFP は Social Force Potential，BP は Behavior Potential，

CP は Congestion Potential のことであり， $U_{oh}$  と  $U_{or}$  は，人とロボットに用いられたポテンシャルの組合せを示している．BP と CP が提案するポテンシャルである．

Table. 1 Result for environment shown in Fig.5(a)

$U_o$	$U_{oh}$	NP	SFP	BP	NP
	$U_{or}$	NP			CP
Time [s]		736.7	417.3	476.6	586.7
Collisions		202.4	181	18.4	187.4

Table 1 の結果から， $U_{or}$  を NP としたとき， $U_{oh}$  も NP とすると最も時間がかかり，かつ，衝突回数が増えていることが分かる．時間は，SFP が最も短かったが，その一方で，BP と比べると衝突回数が 10 倍以上も増えている．SFP と BP を，単位時間当たりの衝突回数で比較すると， $0.43$  と  $0.04$  となった．また， $U_{oh}$  を NP としたとき， $U_{or}$  を NP と CP の場合で比較すると，時間と衝突回数ともに CP の方が良い結果となった．

Table. 2 Result for environment shown in Fig.5(b)

$U_o$	$U_{oh}$	NP	SFP	BP	NP
	$U_{or}$	NP			CP
Time [s]		228.5	128.2	154.0	230.6
Collisions		71.8	60.4	6.1	67.4

Table 2 より，ロボットで混雑した環境においても  $U_{or}$  を NP とすると， $U_{oh}$  も NP とすることで最も結果は悪くなり，SFP が時間を最も短縮するが，BP と比べ衝突回数が 10 倍に増え，単位時間当たりの衝突回数も  $0.47$  と  $0.04$  で 10 倍以上の差が出る結果となった．また， $U_{oh}$  を NP とし， $U_{or}$  を NP と CP の場合で比較すると，時間に違いは見られなかったものの，衝突回数は CP により減少する結果となった．

以上のことから，障害物の動特性を考慮した衝突回避ポテンシャル，ならびにロボットの混雑を考慮しそれを緩和するためのポテンシャル，それぞれの有効性が示された．また，これらの有効性はロボットの混雑に関わらず，確認することができる．

### 6.3 動作計画法としての有効性

Table 1 と Table 2 の結果について考察するため，各ロボットの移動方向の変化に着目する．これは，ロボットがポテンシャルに従って動作する際の無駄な動きを定量化した無次元の統計指標であり，式 (6) における平均方向母数  $\kappa$  となる．したがって，値が大きいと，ロボットは方向変化のない移動が行えていることを意味する．Table 3 に，全ロボットの平均移動方向母数を示す．

Table. 3 Concentration of robots' direction

$U_o$	$U_{o_h}$	NP	SFP	BP	NP
	$U_{o_r}$	NP			CP
Fig.5(a)		4.32	6.69	6.20	4.84
Fig.5(b)		4.06	6.25	5.58	4.02

この結果から、Table 1 と Table 2 いずれにおいても  $U_{o_h}$  が SFP,  $U_{o_r}$  が NP の結果で時間が最も短くなり、その一方で衝突回数が多かったのは、ロボットが障害物回避よりも目的地まで無駄なく移動するよう動作計画を行ったことが原因であること分かる。 $U_{o_h}$  が NP と BP の結果で比較すると、障害物の動特性を考慮することで、無駄な回避動作が減り、これにより SFP と同程度の時間で、かつ衝突回数を 1/10 以下に減らすことができた。

$U_{o_h}$  を NP,  $U_{o_r}$  を NP および CP とした結果で比較すると、Fig.5(a) では CP による値が大きく、Fig.5(b) では CP の値が小さくなった。これは、Fig.5(b) が Fig.5(a) よりもロボットで混雑していたため、それを緩和するようロボットが大きく方向を変更したこと示している。そのため、Fig.5(a) では時間も衝突回数も CP により改善されたが、Fig.5(b) では、時間に変化が見られなかった。ただし、混雑緩和により人との衝突回数は減少した。

そこで、人の動特性とロボットの混雑を同時に考慮した斥力ポテンシャル  $U_o = U_{o_h} + U_{o_r}$  を、Fig.5(a) と Fig.5(b) に生成した。この結果結果を Table 4 に示す。

Table. 4 Proposed potential:  $U_{o_h}$  is "BP" and  $U_{o_r}$  is "CP"

	Time [s]	Collisions	Concentration
Fig.5(a)	434.3	15.3	6.44
Fig.5(b)	149.8	4.6	5.79

Table 1, Table 2, Table 3 いずれの BP と CP, それぞれ一つのみを用いた結果と比べ、時間、衝突回数、そして平均移動方向母数全て良くなったことが分かる。したがって、動特性ポテンシャルと混雑緩和ポテンシャルは互いに背反することなく、加重和の斥力ポテンシャルとして安全性と効率性の両方を満たしたロボット群制御に向けた動作計画法として、有効であることが示された。

## 7 結言

本研究では、複数台のロボットと人が存在するシステムを対象に、人への安全性とロボットによる作業の効率性、両方を満たしたロボット群制御法について述べた。ロボットの動作計画には、人工ポテンシャル法を適用した。このとき、人との衝突回避のため、動特性を考慮した斥力ポテンシャルの変形を行った。また、ロボットの

混雑を緩和するため、多峰性でなく単峰性の斥力ポテンシャルを生成した。そして、シミュレーション実験から、提案ポテンシャルの動作計画に向けた有効性を示した。

## 謝辞

本研究は、平成 25 年度世界一を目指す研究開発助成事業の支援により実施された。

## 参考文献

- [1] O. Khatib: Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots, International Journal of Robotics Research, Vol. 5, No. 1, pp. 90–98 (1986)
- [2] T. Balch and M. Hybinette: Social Potentials for Scalable Multi-Robot Formations, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 73–80 (2000)
- [3] D.H. kim and S. Shin: New Repulsive Potential Functions with Angle Distributions for Local Path Planning, Vol. 20, No. 1, pp. 25–47 (2006)
- [4] S.S. Ge and Y.J. Cui: Dynamic Motion Planning for Mobile Robots Using Potential Field Method, Vol 13, No. 3, pp. 207–222 (2002)
- [5] L. Huang: Velocity Planning for a Mobile Robot to Track a Moving Target — A Potential Field Approach, Vol. 57, No. 1, pp. 55–63 (2009)
- [6] 熊原 渉 他：局所経路情報と歩行者流情報に基づく未知動的環境下における移動ロボットナビゲーション, 第 18 回ロボティクスシンポジウム, pp.535–542 (2013)
- [7] S. Hoshino and H. Seki: Multi-Robot Coordination for Jams in Congested Systems, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 61, No. 8, pp.808–820 (2013)
- [8] S. Maniccam: Adaptive Decentralized Congestion Avoidance in Two-Dimensional Traffic, Physica A, Vol. 363, No. 2, pp. 512–526 (2006)
- [9] C. Burstedde *et al.*: Simulation of Pedestrian Dynamics using a Two-dimensional Cellular Automaton, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, Vol. 295, No. 3-4, pp. 507–525 (2001)
- [10] L.C.A. Pimenta *et al.*: Control of Swarms based on Hydrodynamic Models, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1948–1953 (2008)
- [11] M. Okada *et al.*: Human Swarm Modeling in Exhibition Space and Space Design, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 25–30 (2011)
- [12] J.H. Reif and H. Wang: Social Potential Fields: A Distributed Behavioral Control for Autonomous Robots, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 27, No. 3, pp. 171–194 (1999)