

# 人との共存のための移動ロボットの適応的な動作生成

○増山岳人<sup>[1][2]</sup>, 川端邦明<sup>[2]</sup>, 淺間一<sup>[1]</sup>  
<sup>[1]</sup> 東京大学, <sup>[2]</sup> 理化学研究所

## Adaptive Motion Control of Mobile Robot for Human-Robot Coexistence

○Gakuto MASUYAMA<sup>[1][2]</sup>, Kuniaki KAWABATA<sup>[2]</sup>, and Hajime ASAMA<sup>[1]</sup>  
<sup>[1]</sup>The University of Tokyo, <sup>[2]</sup>RIKEN

**Abstract**— In recent years, researches for service robot system are done actively. Suppose like porter service, human following function is important. In this paper, we propose control system for human following motion of mobile robot. To realize safe motion, task execution and real time operation simultaneously, we applied velocity field control. The velocity field is generated by advanced potential field method. And that is tracked by PVFC (Passive Velocity Field Control). We introduced available kinetic energy of mobile robot as index of safety and designed controller to manipulate it. The effectivity of this system is reviewed by computer simulation.

**Key Words:** Mobile Robot, Velocity Field Control, Potential Field Method

### 1. はじめに

近年、人の生活環境における移動ロボット技術を応用したサービス提供システムの研究<sup>[2]</sup>が盛んに行われている。想定されるタスクとしては主に道案内、物品搬送等が挙げられるが、例えば荷物運び等のサービスを提供する場合には特定の人物を追従する動作を環境の変化に対して適応的に生成する必要がある。また、このような環境においては安全性と効率的なタスクの実行といった競合する複数の条件のバランスを考慮し、実時間でロボットの動作を生成しなければならない。

そこで本研究では人との共存環境を想定した動的な環境においてロボットが障害物を回避しながら目標地点へ到達するタスクを例にとり、実時間で安全性について考慮された動作を生成する制御システムの提案を目的としている。具体的にはポテンシャル法を応用して速度場を生成し、PVFC(Passive Velocity Field Control)<sup>[1]</sup>によりこれを追従する速度場追従制御システムとなっている。さらに安全性の指標として、ロボットの使用する運動エネルギー量と障害物位置に張る斥力ポテンシャルを導入し、これらを調整する機構について提案する。以下に本稿で扱う問題の条件について定義する。

#### 想定条件

制御対象には例として理化学研究所にて開発されたホロノミック移動ロボット<sup>[3]</sup>を用い、壁や通路等はない freespace での2次元平面運動を想定とする。また領域内の人、障害物として設定する物体の位置は全て検出されていることとする。

### 2. 設計方針

本研究では移動ロボットによる人の追従を目的としているが、その際にまず重要となるのはロボットに与える行動の指針である。まず、多くの研究がなされてきた時間軌道追従制御の手法を人の追従を目的に適用することを考えてみると *radial reduction*<sup>[1]</sup> と呼ばれる現象が問題となる。これはロボットに与えられる参照

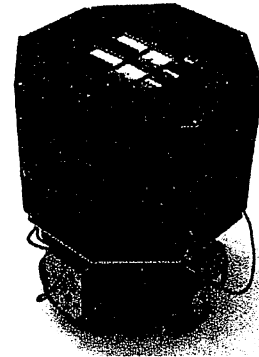


Fig.1 Mobile Robot ZEN

入力が各時刻における目標位置であるため、ロボットの通る軌道の曲率半径が小さくなるというものである。簡単に言えば所望の軌道を正確にトラッキングすることが優先されるとは限らないということになる。人との共存環境においては正確なタイミングよりも安全性が確保された経路を正確に追従するような動作を生成することが重要であり、この現象は人との衝突等の致命的な問題に繋がる可能性がある。

また、時間軌道ではなく経路のみを得るための手法として移動ロボットやマニピュレータ等を対象とした経路計画法<sup>[4]</sup>も従来より数多く研究されてきた。これらの手法には定めた基準に対する最適性を求めることが可能であったり、明示的に移動経路を決定できるといった利点があるものの、動的な環境においては計算コストの面から必ずしも得策ではないと考えられる。

これらから人との共存環境においては計算コストを抑え、実時間で安全性を確保した経路を移動する動作を生成する手法の構築が必要であるといえる。そこで本研究ではロボットの通るべき経路を速度場で記述し追従する速度場制御を適用することとする。よって本稿のシステムでは参照入力となる速度場と、それを追

従するコントローラを実時間性、安定性、安全性を考慮して設計する。

### 3. ポテンシャル法

本節では障害物の回避とターゲットとなる特定人物位置の追従のための目標動作となる速度場の設計について議論する。言い換えれば、動的な環境下でロボットが安全性の確保された軌道を通り、目標位置まで到達するためにコントローラに与えられる参照入力を実時間で生成する手法を設計することがここでの目的となる。そこで本研究では人や障害物の詳細なモデルが既知でなくても適用可能かつ実時間性を持った手法として、移動ロボットやマニピュレータの経路計画法として広く用いられているポテンシャル法を利用して目標速度場を生成することとする。

#### 3.1 問題設定

通常、ポテンシャル法では関数の局所最小点においてデッドロックと呼ばれる停留現象が生じる可能性がある。静的な環境であれば停留点においてロボットは停止してしまい、動的な環境であれば障害物の移動による停留点の移動に合わせて押し流されるような現象が起こる。動的な環境下ではデッドロックに陥ってしまっても環境の変化によってポテンシャル関数の局所最小点自体が消滅し、最終的には目標地点に到達するという可能性も考えられるが、時間や移動距離といった面でタスクの実行効率の低下は否めない。したがってポテンシャル法をそのまま適用することは、ロボットに実装した際に目標（本研究では人）の位置を喪失する可能性が増大するという点においても適切ではないと考えられる。そこで本研究ではポテンシャル法により構成される勾配系を解析し、その利点を損なうことなくデッドロックを回避可能なフィードバックを設計する。

#### 3.2 フィードバックの設計

まず移動ロボットの状態量を  $\mathbf{q} = [x \ y]^T$  とする。通常のポテンシャル法にしたがい、目標地点に張る引力ポテンシャル  $U_a(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}_+$ 、 $i$  番目の障害物に張る斥力ポテンシャル  $U_{o_i}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}_+$ 、 $i = 1 \dots n$ 、斥力ポテンシャルの総和を  $U_o(\mathbf{q}) = \sum_{i=1}^n U_{o_i}(\mathbf{q})$  とする。これらの関数は原点に安定平衡点をもつこととする。ポテンシャル法ではデッドロックという問題はあるものの、この仮想的なポテンシャル関数の勾配方向にロボットが移動するよう入力を与えることで結果的に障害物の回避、目標地点への到達という成果を簡単に得ることができる。本稿ではさらに勾配方向以外の入力を与えることでデッドロックを回避することを考える。しかし何の制約もなくフィードバックを設計すれば斥力ポテンシャル関数の勾配方向の成分をもつことが許容されるため、場合によっては障害物位置の近傍を乗り越えてしまうような速度場が生成されてしまうことになる。このような問題を避けるため、本稿では斥力ポテンシャル関数の等高線方向のフィードバックによって系を漸近安定化することを考える。

簡単のため単位質量を持つ質点を制御対象とすると、そのモデルは入力  $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^2$  として以下ようになる。

$$\dot{\mathbf{q}} = -\nabla U_a(\mathbf{q}) - \nabla U_o(\mathbf{q}) + \mathbf{u} \quad (1)$$

今、引力ポテンシャル関数  $U_a(\mathbf{q})$  をリアプノフ関数とするとその時間微分は

$$\begin{aligned} \dot{U}_a &= \nabla U_a^T \dot{\mathbf{q}} \\ &= -\|\nabla U_a\|^2 - \nabla U_a^T \nabla U_o + \nabla U_a^T \mathbf{u} \end{aligned} \quad (2)$$

$\mathbf{u} \equiv \mathbf{0}$  であるとするればシステムは通常のポテンシャル法による勾配系となる。これが局所解に陥るときには引力ポテンシャルと斥力ポテンシャルの勾配ベクトルの内積  $\nabla U_a^T \nabla U_o$  が負となり、その結果リアプノフ関数の時間微分が 0 になると考えられる。  $\nabla U_a^T \nabla U_o < 0$  であるとは、例えばロボットと目標位置との間にポテンシャルの山があるような状況である。したがって  $\nabla U_a^T \nabla U_o \geq 0$  となる平衡点を含む領域にロボットを移動させることが出来ればシステムを漸近安定化できると考えられる。

そこで歪対称行列の二次形式が 0 となることから、斥力ポテンシャル関数の等高線方向のベクトルを

$$J = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$$

なる歪対称行列  $J$  と斥力ポテンシャルの勾配ベクトルの積で構成する。さらに、 $s \in \mathbb{R}$  として  $\mathbf{u}$  を以下のような形とする。

$$\mathbf{u} = -s(\nabla U_a^T \nabla U_o) J \nabla U_o \quad (3)$$

このフィードバックは斥力ポテンシャルの等ポテンシャル面上を  $\nabla U_a^T \nabla U_o = 0$  となる位置まで移動するように作用する非線形なダンパと考えることが出来る。また、ここで  $s$  を

$$s = \frac{\nabla U_a^T \nabla U_o - \|\nabla U_a\| \|\nabla U_o\|}{\|\nabla U_a\| \|\nabla U_o\| \|\nabla U_a^T J \nabla U_o\|} \quad (4)$$

とすると、リアプノフ関数の時間微分は

$$\begin{aligned} \dot{U}_a &= -\|\nabla U_a\|^2 - \nabla U_a^T \nabla U_o (1 + s \nabla U_a^T J \nabla U_o) \\ &= -\|\nabla U_a\|^2 - \frac{(\nabla U_a^T \nabla U_o)^2}{\|\nabla U_a\| \|\nabla U_o\|} \leq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

となり、系を漸近安定化する補償器が設計できたことになる。ただし、 $\nabla U_a^T J \nabla U_o = 0$  の点は特異点となるため、本稿では  $s$  を以下の形のものに書き換え、さらに有界となるよう上限値を抑えて用いることとする。これは  $J$  の符号や成分のノルムに対する操作であると解釈することが出来るだろう。

$$s = \frac{\nabla U_a^T \nabla U_o - \|\nabla U_a\| \|\nabla U_o\|}{\|\nabla U_a\| \|\nabla U_o\| \|\nabla U_a^T J \nabla U_o\|} \quad (6)$$

この補償器により斥力ポテンシャルを一定方向に回り込み続け、最終的に漸近安定領域に到達することができると考えられる。また、提案した補償器は  $\nabla U_a^T J \nabla U_o = 0$

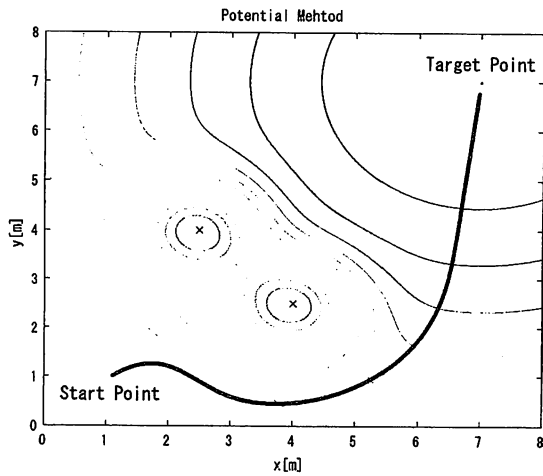


Fig.2 Effect of Contour Feedback

となる位置近傍においてノルムの大きな速度場が生成される。これはロボット、障害物、ターゲットが直線上に並んでいるような状況であり、結果としてロボットは早めに障害物を回避できる位置へ移動するという効果が得られる。

### 3-3 検証実験 1

提案したポテンシャル法へのフィードバックの有効性を検証するためのシミュレーション実験を行った。ここでも単位質量をもつ質点を制御対象として扱うこととする。Fig.2の×印は障害物、点は目標位置、実線は質点の軌道であり、さらにポテンシャル関数の総和の等高線を示した。このポテンシャル場で通常のポテンシャル法を用いると、障害物手前の局所最小点においてデッドロックが生じるが、本手法を適用することで局所最小点を避け、障害物に対して張られた斥力ポテンシャルを迂回し目標位置へ到達することが確認できた。

ここまででポテンシャル法における問題点である局所最小点におけるデッドロックを回避し、目的位置へロボットを移動させるための速度場が設計できたわけだが、例えばロボットが障害物に囲まれているような状況では、漸近安定化された速度場は生成されるべきではないと考えられる。本稿で提案したポテンシャル法では  $\nabla U_0^T \nabla U = 0$  であるような速度場の積分曲線が平衡点に至らなければ、系が漸近安定化されることはない。したがってロボットが障害物に囲まれ、斥力ポテンシャルの等位面によってつくられる閉領域に平衡点が含まれないような場合には系は漸近安定化されないため、本手法では自然に問題の切り分けがなされていると考えられる。また、斥力ポテンシャルが移動する動的な環境においては障害物を回避しやすい位置、つまり  $|\nabla U_0^T \nabla U|$  が小さい位置に早めに移動することが重要である。したがって斥力ポテンシャルの山の裾を適当な広さに設定することで、システムに対する設計者の意向を反映しつつ本手法を有効に利用することができるといえる。

## 4. コントローラ的设计

前節ではポテンシャル法を利用した速度場の設計を行った。ここでは設計した目標速度場をロボットが追従するためのコントローラ的设计を行う。本研究では人との共存環境における移動ロボットの動作を得る制御システム的设计を目的としている。したがってタスク実行に必要なものも含めて人とのフィジカルなインタラクションが想定されるため、目標速度場に対する安定性はもちろん、安全性という点を積極的に考慮して設計を行うことが重要となる。

そこで本研究では速度場追従制御手法の中でも特に Passive Velocity Field Control (PVFC) のもつ外力に対する受動性という性質に注目し、これを利用することを考える。さらに移動ロボットに使用を許す運動エネルギー量を安全性の指標として導入し、状況に応じた使用可能エネルギー量の動的な操作による安全性と人追従タスクの効率性のバランスをとる補償器を設計する。

### 4-1 PVFC の概要

PVFC は元来、人との物理的なインタラクションを前提とするエクササイズ機器への適用を目指して設計されたコントローラであり、システムの状態を仮想的に1次元拡大した拡大システムの運動エネルギー量を操作することで外力に対するエネルギー的な受動性を得ることができるという性質をもつ<sup>[1]</sup>。PVFCにおける受動性とは拡大システムの運動エネルギーの変化量は外力のする仕事に等しくなるというものである。したがって、外力が存在しなければその拡大システムのエネルギー量は一定に保たれるため、システムは初期状態によって定まる一定のエネルギー量の範囲内で速度場を追従することになる。安定性に関しては、外力が作用しなければシステムは所望の速度場の任意の実数倍に対して安定化され、システムのもつ運動エネルギーによって決まるある定数倍の速度場に対しては漸近安定化されるという特長を有する。

上述の通り、PVFCを適用することで拡大システムはエネルギー的な受動性を満足しつつ制御され、その結果、実システムの使用できるエネルギー量は外力によるエネルギーの流入出がなければ一定となる。これは仮想的に付加された状態と実システムの間でエネルギーがやりとりされることに起因する。したがって付加された状態に対してなんらかの補償器を設計し、そのエネルギー量を操作することで実システムに使用を許すエネルギー量を操作することができると考えられる。

### 4-2 エネルギーのコントロール

ここではPVFCを利用した使用可能エネルギー量の補償器として、あらかじめパラメータとして決定した目標とするエネルギー量に拡大システムのエネルギー量を直接漸近させる補償器を提案する。具体的には以下のようなものである。

$$\bar{\tau}_k = \begin{bmatrix} 0 \\ \eta_k (E_d - \bar{k}(\bar{q}, \dot{\bar{q}})) \dot{q}_{vf} \end{bmatrix} \quad (7)$$

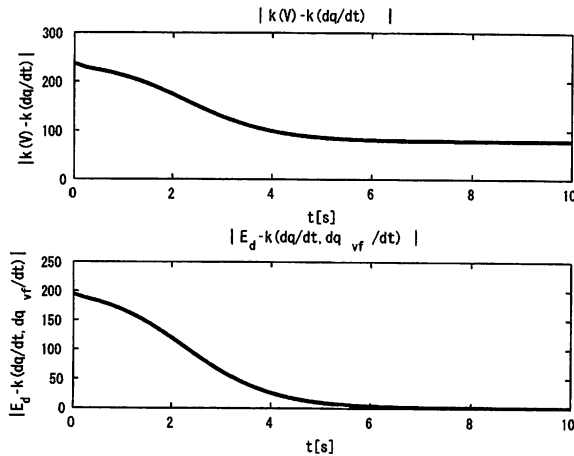


Fig.3 Effect of Energy Controller

直接的には仮想的に拡大された状態にのみ作用する形となっている。ここで  $\eta_k \in \mathbb{R}_+$  は定数、 $\bar{q} \in \mathbb{R}^3$  は拡大システムの状態量、 $E_d \in \mathbb{R}_+$  は拡大システムの目標運動エネルギー、 $\bar{k}(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) \in \mathbb{R}_+$  は拡大システムの運動エネルギー、 $q_{vf} \in \mathbb{R}$  は付加された状態量である。この補償器により、外力が加えられないとすれば拡大システムの運動エネルギーの変化量は

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \bar{k}(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) &= \bar{\tau}_k^T \dot{\bar{q}} \\ &= \eta_k (E_d - \bar{k}(\bar{q}, \dot{\bar{q}})) \dot{q}_{vf}^2 \end{aligned} \quad (8)$$

となる。したがってもし  $E_d > \bar{k}(\bar{q}, \dot{\bar{q}})$  であるならば、拡大システムは目標とするエネルギー量より少ないエネルギー量の範囲内で速度場を追随していることになるわけだが、この補償器により付加された状態に対して仕事がなされる。すると拡大システムのエネルギー量が  $E_d$  となるまで増大し、その結果、実システムが使用できるエネルギー量が増えることになる。逆の場合も同様であり、この補償器により拡大システムのエネルギー量を任意の値に漸近させることが可能となる。

また、エネルギー量を速度場に対応して決定するわけではないため、この補償器は必ずしもリアプノフの意味での安定性を保証するものではない。しかしながらエネルギー量が所望の値になれば、つまり  $\bar{\tau}_k \rightarrow 0$  となれば受動性が満足され、PVFCにより設計者が規定した任意の使用可能なエネルギー量の範囲内で速度場が追随されることになる。

#### 4.3 検証実験 2

設計したコントローラの効果を確認するためにノルム、方向ともに一定の速度場を追随する実験を行った。目標速度場は  $V \in \mathbb{R}^2$  と表記する。Fig.3の上図は目標速度場の運動エネルギーと実システムの運動エネルギーの差の絶対値  $|k(q, V) - k(q, \dot{q})|$  である。下図はシステムに許容する目標運動エネルギーと拡大システムの運動エネルギーの差の絶対値  $|E_d - \bar{k}(\bar{q}, \dot{\bar{q}})|$  である。Fig.3下図より時間とともに拡大システムの運動エネルギー量が設定した目標値に漸近し、Fig.3上図より

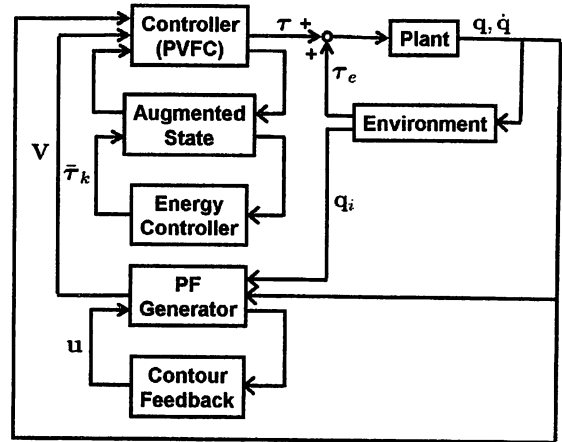


Fig.4 System

その許容された範囲内で目標速度場を追随する動作が実現されていることが確認できる。

## 5. システム構成

ここまでで設計したポテンシャル法による速度場生成器と、PVFCによるコントローラを用いて本稿のシステムは Fig.4 のように構成される。目標位置、障害物位置などのセンサ情報と移動ロボットの状態量からポテンシャル場が構成され、さらにそのポテンシャル関数の勾配系に対して斥力ポテンシャルの等高線方向のフィードバック  $u$  が加えられることで速度場  $V$  が構成される。これが仮想的に付加された状態を含めた PVFC によるコントローラに対する参照入力となる。さらに拡大システム、特に付加された状態に対してエネルギー量の補償器によるフィードバックが施されて得られる制御入力  $\tau$  が外力  $\tau_e$  とともに制御対象に入力される。これが本稿で提案するシステムの概要となる。

本システムは、操作する許容エネルギー量の外部環境に対する設計方法、あるいは斥力ポテンシャル関数の選択とパラメータ設定による等高線方向のフィードバックの活用の仕方などによって安全性に関する設計者のポリシーを反映しやすい構成となっている。

## 6. シミュレーション

本稿で提案したシステムの有効性を検証するため、人との共存環境を想定した動的な環境における移動ロボットの動作シミュレーション実験を行った。

### 6.1 制御対象

本研究では制御対象として理化学研究所で開発されたホロノミック移動ロボット ZEN を取り上げている。ここではロボットの状態量を  $q = [x \ y \ \theta]^T$  としてそのダイナミクスを導出した。ボディの質量  $m_c$ 、ボディの中心回りの慣性モーメント  $I_c$ 、ホイールの質量  $m_w$ 、ホイールの回転軸回りの慣性モーメント  $I_w$ 、ホイールのボディ中心回りの慣性モーメント  $I_m$ 、ホイールの半径  $r$ 、ボディ中心からホイールまでの距離  $d$  とする。また、 $m = m_c + 4m_w$ 、 $I = 4m_w d^2 + I_c + 4I_w$

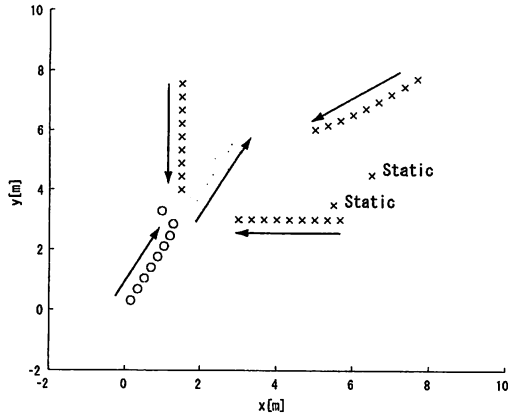


Fig.5  $t = 3[s]$

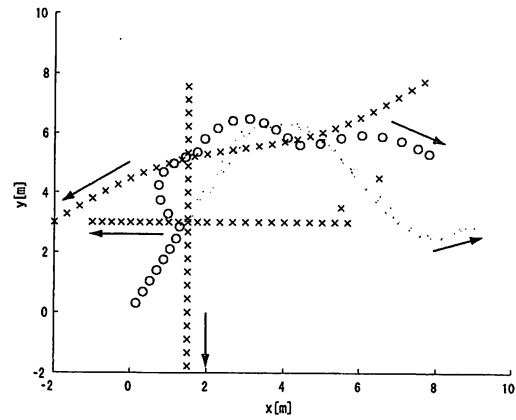


Fig.7  $t = 10[s]$

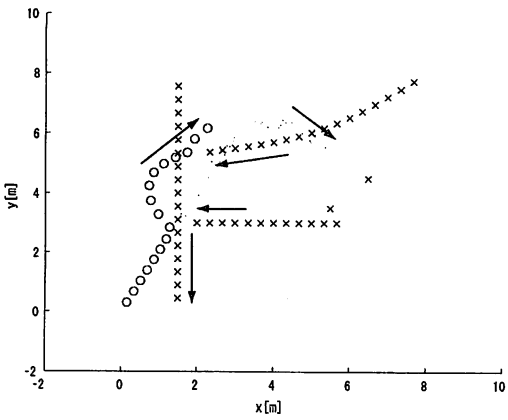


Fig.6  $t = 5.8[s]$

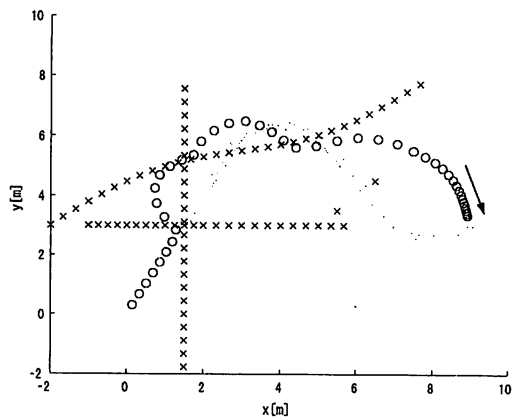


Fig.8  $t = 15[s]$

とおくとそのダイナミクスは

$$M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} = \tau \quad (9)$$

となる。ここで

$$M(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} m + \frac{2I_w}{r^2} & 0 & -\frac{2I_w x}{r^2} \\ 0 & m + \frac{2I_w}{r^2} & -\frac{2I_w y}{r^2} \\ -\frac{2I_w x}{r^2} & -\frac{2I_w y}{r^2} & I + \frac{2I_w(x^2 + y^2 + 2d^2)}{r^2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

は慣性行列で

$$C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{2I_w \dot{\theta}}{r^2} & -\frac{2I_w}{r^2}(\dot{x} + y\dot{\theta}) \\ -\frac{2I_w \dot{\theta}}{r^2} & 0 & -\frac{2I_w}{r^2}(y - x\dot{\theta}) \\ \frac{2I_w y \dot{\theta}}{r^2} & -\frac{2I_w x \dot{\theta}}{r^2} & -\frac{2I_w}{r^2}(x\dot{x} + y\dot{y}) \end{bmatrix} \quad (11)$$

は遠心・コリオリ行列である。

## 6.2 シミュレーション設定

ロボット、人、障害物の移動する領域は2次元平面上の freespace とする。ポテンシャル関数は原点が平衡点の時以下のものとした。

$$U_i(\mathbf{q}) = a_i \mathbf{q}^T \mathbf{q} \exp\left(-\frac{(\mathbf{q} - \mathbf{q}_i)^T (\mathbf{q} - \mathbf{q}_i)}{b_i^2}\right) \quad (12)$$

$i = 1 \dots n$  の時、 $U_i$  はそれぞれの障害物に対して張る斥力ポテンシャルとする。 $a_i \in \mathbb{R}_+$ 、 $b_i \in \mathbb{R}$  は定数であり、 $\mathbf{q}_i \in \mathbb{R}^2$  は各々の斥力ポテンシャルの極大点が障害物位置となるよう調整したパラメータである。また、 $i = 0$  の時  $\mathbf{q}_0 = \mathbf{0}$  とし、 $b_0$  を十分大きくすることで  $U_0$  を引力ポテンシャルとして扱うこととする。15[s]のシミュレーションで、追従ターゲットと3点の動的な障害物は10[s]移動し、その後5[s]停止する。さらに2点の静止障害物を設定した。ロボットは静止状態から動き始める。

また、本稿では安全性と効率性の指標としてロボットの使用可能な運動エネルギー量というものを導入したが、これを最近傍の障害物との距離  $d_{min}$  に対応して以下のように変化させた。

$$E_d = 30 + 120 \tanh\left(\frac{d_{min}}{2}\right) \quad (13)$$

障害物との距離が近いときには  $E_d$  を小さく、逆に遠いときには大きくするが上限を設定したということになる。したがってロボットの近くに障害物が存在する場合には許容するエネルギーを少なくすることで安全性を高め、そうでない場合にはロボットに使用を許すエネルギー量を上限値の範囲内で増やし速度場を追従することで目標位置への到達というタスク実行の効率性を高めることができると考えられる。

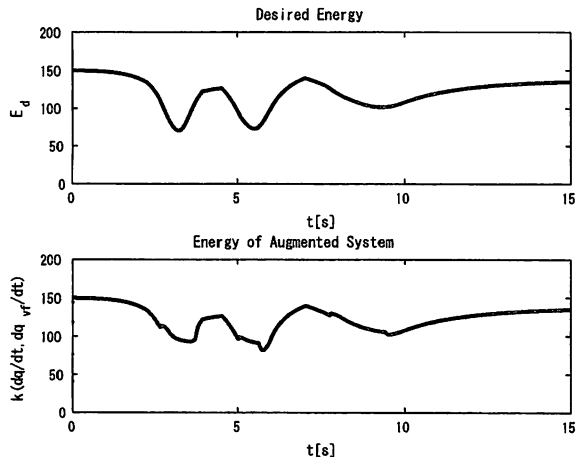


Fig.9 Transition of Available Energy

### 6.3 結果

上述の設定でシミュレーションを行った。Fig.5は  $t = 3[s]$ , Fig.6は  $t = 5.8[s]$ , Fig.7は  $t = 10[s]$  (以降ロボット以外はその位置に停止), Fig.8は終端状態  $t = 15[s]$  におけるロボット, 追従ターゲット, 障害物の移動の様子である。これらの図において○がロボットの位置, ▽がターゲット位置, ×が障害物位置を表している。通常のポテンシャル法では  $t = 3[s]$  の時点前後でロボットのコンフィギュレーションがポテンシャル関数の局所最小点に落ち込み, 以降障害物の移動に伴う局所最小点の移動によって押し流されてしまう。しかし本稿のシステムでは斥力ポテンシャルを回り込みながらロボットが障害物位置を迂回し, 目標地点に到達することが確認できた。

次にこの実験において設計したエネルギー量補償器からどのような効果が得られたのかを確認する。Fig.9の上図は拡大システムの目標運動エネルギー量  $E_d$  の時間推移, 下図は拡大システムの運動エネルギー量  $\bar{k}(\dot{q}, \dot{q})$  の時間推移をプロットしたものである。若干の時間遅れがみられるものの概形は一致しており, 意図通り目標運動エネルギー量を追従していることがわかる。また, Fig.10の上図は実目標速度場による運動エネルギー量  $k(\dot{q}, V)$  の時間推移で, 下図は実システムの運動エネルギー量  $k(\dot{q}, \dot{q})$  の時間推移を示している。まず, 上図に注目すると実目標運動エネルギー量が大きく変化するタイミングが3箇所確認できる。本稿で提案したポテンシャル法は引力ポテンシャルの勾配と斥力ポテンシャルの勾配の方向が一致する位置を素早く避け, それらが直交する位置へ移動するような速度場が生成されている。したがって実目標運動エネルギー量が大きく増加, 減少している領域は障害物との距離がある程度近くなり障害物を回避する速度場の影響力が大きく, そして小さくなるタイミングをそれぞれ意味する。

これに対し下図の実システムの運動エネルギー量も概形としてはPVFCによって速度場を追従しているため, 上図と似たものとなっている。しかし実システムが使用できるエネルギー量は Fig.9 下図の量に制限されているため, 障害物の迂回速度の大きさの上限もま

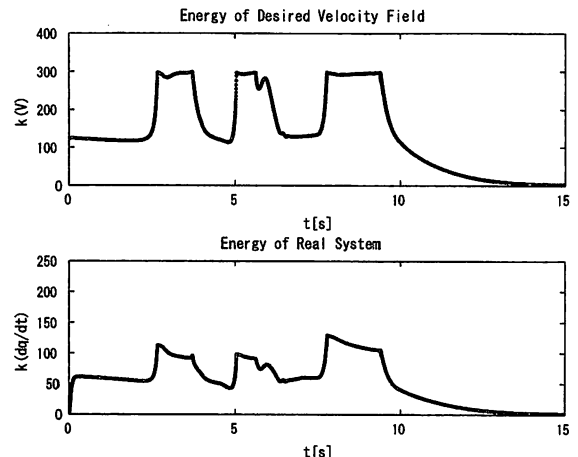


Fig.10 Transition of Used Energy

た制限されている。したがって, 障害物に張られた斥力ポテンシャルをエネルギーを高めて早めに迂回する経路をとりつつ, 最近傍の障害物との距離に応じて使用するエネルギー量を調整する動作が実現できていることが確認できた。また, 本システムにおける回避行動には LRF 等のセンサの使用を想定した場合, センサの特性を考慮してオクルージョンを避ける位置へロボットを事前に移動させるという効果も期待することができる。

### 7. まとめ

本稿では人との共存環境における移動ロボットの運用を想定した適応的な人追従動作を実現するための制御システムを提案した。速度場追従制御としてPVFCを適用した。さらに安全性と効率性のバランスを動的に変化させるための指標としてPVFCにおける拡大状態の運動エネルギー量を導入し, これを目標値に漸近させる補償器を設計した。また, 速度場の構成手法としてポテンシャル法を応用して適用した。斥力ポテンシャルの等高線方向のフィードバックを加えることによりデッドロックを回避し, 障害物位置を迂回し目標位置へ到達可能な速度場を実時間で生成する手法を提案した。提案したシステムの有効性をシミュレーションにより検証した。

展望としては, 拡大システムの目標運動エネルギー量と斥力ポテンシャル関数の設計による安全性と効率性との相関に関する検討を行う。

### 参考文献

- [1] P.Y. Li et al. : Passive Velocity Field Control of Mechanical Manipulators, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol.15, No 4, 1999.
- [2] 山本健次郎他: 人間共生ロボット "EMIEW" の衝突回避ナビゲーション, 第24回日本ロボット学会学術講演会, 1L23, 2006.
- [3] K. Kawabata et al. : Omnidirectional Mobile Platform for Research and Development, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.14, No 2, pp.105/111, 2002.
- [4] J.-C. Latombe : Robot Motion Planning, *Kluwer Academic Publishers*, 1991.

19<sup>th</sup> SICE Symposium on Decentralized Autonomous Systems  
January 29-30, 2007, Tokyo

# 第19回自律分散システム・シンポジウム

## 資 料

期 日：2007年1月29日(月)，30日(火)

会 場：東京工業大学 大岡山キャンパス



**SICE®**

企 画：自 律 分 散 シ ス テ ム 部 会  
主 催：(社) 計 測 自 動 制 御 学 会 シ ス テ ム ・ 情 報 部 門  
The Society of Instrument and Control Engineers

協 賛：システム制御情報学会，電子情報通信学会，電気学会，情報処理学会，  
人工知能学会，日本ロボット学会，日本機械学会，精密工学会，日本神  
経回路学会，日本生体医工学会，応用物理学会，日本生物物理学会，化  
学工学会，Japan Chapter of IEEE Control Systems Society, Japan Chapter of  
IEEE Systems, Man, and Cybernetics  
身体・脳・環境の相互作用による適応的運動機能の発現に関する調査研究会

カタログ番号 07 SY 0001