

人との共存環境における移動ロボットの適応的な人追従動作生成

増山岳人^{[1][2]}, 川端邦明^[2], 浅間一^[1]
^[1] 東京大学, ^[2] 理化学研究所

Adaptive Human Following Control for Mobile Robot in Human-Robot Coexistence Environment

Gakuto MASUYAMA^{[1][2]}, Kuniaki KAWABATA^[2], and Hajime ASAMA^[1]
^[1]The University of Tokyo, ^[2]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 safety conditions and task execution simultaneously, potential field method and PVFC (Passive Velocity Field Control) are applied. The results of computer simulation are reported.

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が盛んに行われている^[2]. 考え得るタスクとしては道案内, 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想定した場合, 検出された人の移動を追従する動作を生成する必要がある. また, 人と移動ロボットが共存する環境では, ロボットに課せられたタスクを実行すると同時に安全性等の条件を常に満足しなければならない. そこで本稿では, 競合するタスク間のバランスを考慮した上で, 実時間で移動動作を生成する手法としてポテンシャル法を応用して速度場を生成し, PVFC(Passive Velocity Field Control)^[1]によりこれを追従するシステムを提案する.

問題設定

本稿では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 ZEN^[3]を制御対象として想定し, フリースペースでの 2 次元平面運動を対象とする. また領域内の物体位置は既知であるとする.

2. コントローラの設計

本研究ではターゲットとなる人物の移動ロボットによる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. 移動ロボット等の経路計画法は従来より数多く研究されてきたが, 動的な環境においてはコスト面から必ずしも得策ではないと考えられる. また, 経路だけでなく速度の指針を与えることも重要である. そこで本研究では安全性の確保のため時間軌道追従で生じる *radial reduction* のような現象を回避し, かつ上述の要件を満たす制御手法として速度場制御に着目する. 特に外部環境に対してエネルギー的な受動性を発現するコントローラである PVFC(Passive Velocity Field Control) を利用したコントローラを提案する.

2.1 PVFC の概要

PVFC ではシステムの状態を仮想的に拡大した拡大システムの運動エネルギー量をコントロールすることで外力に対するエネルギー的な受動性を得ている. そ

の結果, 拡大システムのエネルギーの変化量は外力のする仕事に等しくなる. 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といえる. さらに外力がない場合には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るという特長も持つ.

2.2 エネルギーのコントロール

本研究では仮想的な外力を仮想的な状態に印加することによって拡大システムの利用できる全運動エネルギー量を操作する補償器を設計した. 今 $\alpha \in \mathbb{R}$, $\eta \in \mathbb{R}_+$ を定数, $q \in \mathbb{R}^n$ を実システムの状態, $V \in \mathbb{R}^2$ を実システムの目標速度とし, $e_\alpha := \dot{q} - \alpha V$ をエラー関数として定義する. さらに $k(q, e_\alpha) \in \mathbb{R}_+$ を実エラーシステムの運動エネルギー, $q_{vf} \in \mathbb{R}$ を PVFC において導入された仮想的な状態, この状態に対する目標速度を $V_{vf} \in \mathbb{R}$ とする. この時補償器を以下のように設計することで目標速度場の任意の実数倍に対してエラーシステムを漸近安定化する拡張が可能となる.

$$\bar{\tau}_k = \begin{bmatrix} 0 \\ \eta k(q, e_\alpha)(\dot{q}_{vf} - \alpha V_{vf}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

この補償器により, 人との距離が近い場合には使用可能なエネルギー量を小さく規定することで安全性を確保し, 逆に距離が遠い場合にはエネルギー量を増やしてタスクの効率を上げるといった効果が期待できる.

3. ポテンシャル法

次にロボットが人を追従するための速度場を設計する. ここでは人や障害物の詳細なモデルが既知でなくとも適用可能かつ実時間性を持った手法が求められる. そこで移動ロボットの動作計画手法として一般的なポテンシャル法を適用することとする. 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が生じる可能性がある. 静的な環境においてはロボットは停止してしまい, 動的な環境においては障害物の移動によって押し流されるような現象が起こる. そこで本

研究ではポテンシャル関数から計算されるフィードバックによりこれを漸近安定化する手法を適用する。

ここで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。ポテンシャル法では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が、仮に斥力ポテンシャル関数の勾配方向の成分をもつフィードバックを施すとすると、場合によっては障害物位置を乗り越えるような速度場が生成されてしまう。そこでここ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。

$$\dot{\mathbf{q}} = -\nabla U_a(\mathbf{q}) - \nabla U_o(\mathbf{q}) + \mathbf{u} \quad (2)$$

ここでポテンシャル関数の総和 $U(\mathbf{q}) := U_a(\mathbf{q}) + U_o(\mathbf{q})$ をリアプノフ関数とするとその時間微分は

$$\begin{aligned} \dot{U} &= (\nabla U_a + \nabla U_o)^T \dot{\mathbf{q}} \\ &= -\|\nabla U_a\|^2 - \|\nabla U_o\|^2 - 2\nabla U_a^T \nabla U_o + \nabla U^T \mathbf{u} \quad (3) \end{aligned}$$

となる。 $\mathbf{u} \equiv \mathbf{0}$ であるとすれば系が局所解に陥るときには引力、斥力ポテンシャルの勾配ベクトルの内積が負の値になりリアプノフ関数の時間微分が 0 となる。したがってこの内積の値が 0 になるような位置にロボットを移動させれば、システムを漸近安定化できると考えられる。そこで、

$$\mathbf{u} = -\langle \nabla U_a, \nabla U_o \rangle J \nabla U_o \quad (4)$$

と \mathbf{u} を決める。ここで歪対称行列 J は $s \in \mathbb{R}$ として以下のように定義している。

$$J = \begin{bmatrix} 0 & s \\ -s & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

歪対称行列の二次形式は 0 となるため、この行列 J と斥力ポテンシャルの勾配との積によって等高線方向のベクトルを構成できる。このフィードバックにより s を十分大きく選べば、件の内積の値が 0 に漸近し系を漸近安定化することができる。ただし内積が 0 にならないような状況 (例えばロボットが障害物に囲まれている) では漸近安定化されることはない。つまりこれがロボットがタスクを実行するか否かの違いになり問題の切り分けが実現できることが分かる。

4. シミュレーション

ポテンシャル関数は原点が平衡点の時以下の形とした。

$$U_i(\mathbf{q}) = a_i \mathbf{q}^T \mathbf{q} \exp\left(-\frac{(\mathbf{q} - \mathbf{q}_i)^T (\mathbf{q} - \mathbf{q}_i)}{b_i^2}\right) \quad (6)$$

ここで $i = 1 \dots n$ の時 $a_i \in \mathbb{R}_+$, $b_i \in \mathbb{R}$ は定数で、 $\mathbf{q}_i \in \mathbb{R}^2$ は障害物位置であり斥力ポテンシャルとなる。また、 $i = 0$ の時 $\mathbf{q} = \mathbf{0}$ とし、 b_0 を十分大きくすることで引力ポテンシャルとして扱える。さらに速度場に乘じる定数 α を最近傍の障害物との距離に応じて決定

し、エネルギー量のコントロールを施した結果を Fig.1 に示す。青い丸がロボットの位置、赤い下三角がターゲット位置、黒いバツが障害物位置である。15 秒間のシミュレーションで左上が 3 秒、右上が 6 秒、左下が 10 秒でありこの時点でロボット以外は停止する。右下が 15 秒での結果である。速さを調節しながら障害物位置を迂回し、目標地点に到達していることがわかる。

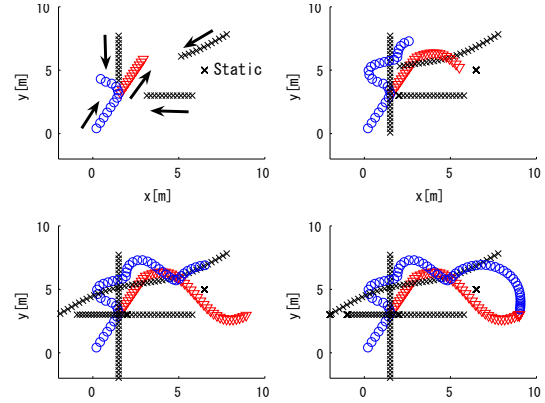


Fig.1 Trajectories of robots

次に補償器の入力と実エラーシステムのエネルギー量の推移を Fig.2 の上図、下図に各々示す。

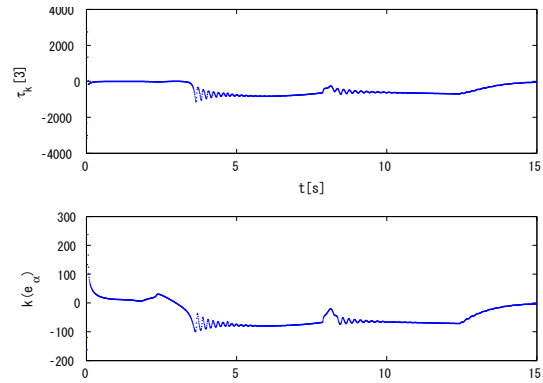


Fig.2 Effect of input for potential method

それぞれの挙動が同期し、最終的には 0 に漸近しているのが見て取れる。このことから設計した補償器が系を漸近安定化していることが確認できる。

5. まとめ

本稿では移動ロボットのエネルギー量を調節しながら動物体を追従する制御システムを提案した。今後の展望としては平衡点との位置関係によるポテンシャル関数の形状変化を操作する機構を設計し、より人との共存環境に適した適応的なシステムを検討する。

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, pp.751-763, 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.