

FL06-31-2

リーダー追尾問題に関する考察と実験



小林尚斗



1. はじめに

・複数台エージェントによる協調制御

・合意(Consensus)問題

- ・ランデブ: 全エージェントを同一点に集合させる問題
- ・フォーメーション: エージェントを希望の隊形にさせる問題
- ・群(Flocking): 各エージェントの速度を一致させる問題

・リーダ追尾問題(Leader Following)

本研究

・各エージェント間の相対姿勢の情報を用いてリーダ追尾を達成する.





2. 本研究の位置づけ

群れ (Flocking)	Ali Jadbabaieら *2	五十嵐ら *1
キネマティクス	$\begin{cases} \dot{x} = \cos \theta_i \\ \dot{y} = \sin \theta_i \\ \dot{\theta} = \omega_i \end{cases}$	$\begin{cases} \dot{p}_i = R_i v_i \\ \dot{R}_i = R_i \hat{\omega}_i \end{cases}$
制御入力	$\omega_i = - \sum_{j \in N_i} \sin(\theta_i - \theta_j)$	$\omega_i = \sum_{j \in N_i} e_R (R_i^T R_j)$

リーダ追尾	Ali Jadbabaieら *2	本研究(小林)
制御入力	$\omega_i = - \left\{ \sum_{j \in N_i} \sin(\theta_i - \theta_j) + c_i \sin(\theta_i - \theta_0) \right\}$?



3. アウトライン

- ・リーダ追尾問題の問題設定
- ・制御則の提案
- ・リーダ追尾達成の証明
- ・シミュレーション、検証実験A
- ・相対位置姿勢を推定するオブザーバの紹介
- ・検証実験B
- ・まとめ、今後の課題



4. リーダ追尾問題

・合意(Consensus)問題



・群れ(Flocking)問題

= すべてのエージェントの速度を等しくする



・リーダ追尾問題

= すべてのエージェントの速度を
リーダの速度と等しくする

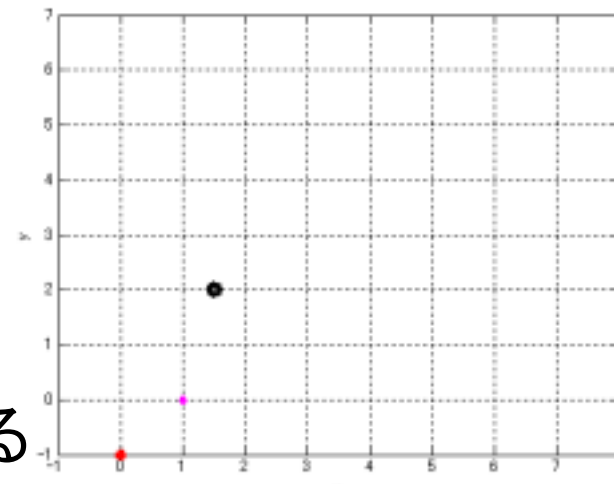


Fig. 群れ(Flocking)

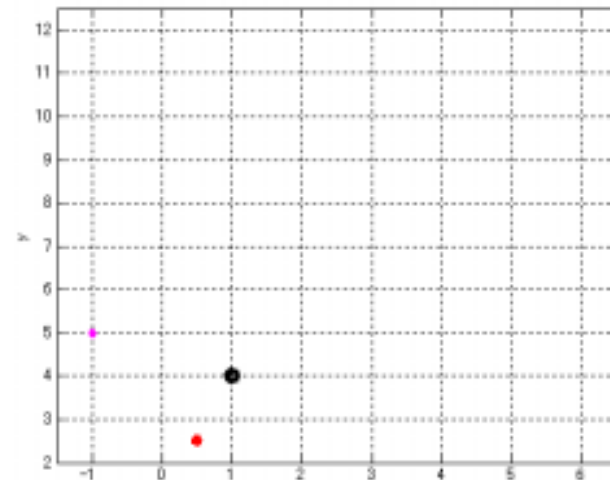


Fig. リーダ追尾



5. 問題設定

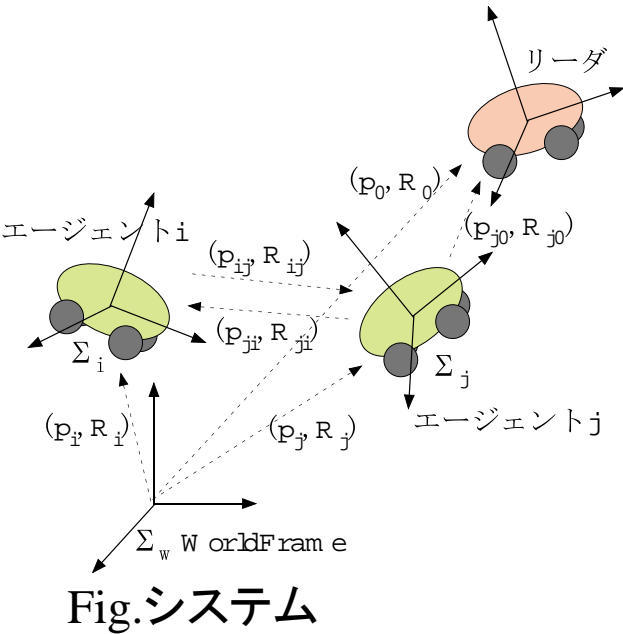
・各エージェントの3次元運動モデル

$$\dot{p}_i = R_i v_i$$

$$\dot{R}_i = R_i \hat{\omega}_i \quad (i = 1, \dots, n)$$

$p_i \in R^3$ 位置
 $R_i \in SO(3)$ 姿勢
 $v_i \in R^3$ ボディ並進速度
 $\omega_i \in R^3$ ボディ角速度

...(1)



・仮定

- 1.すべてのエージェントのボディ並進速度は等しく、変化しない。
- 2.エージェントとリーダーとの相対姿勢 $R_0^T R_i (= E_i)$ はすべて正定である。
- 3.リーダーを含めたシステム全体でグラフは固定、連結であり、リーダーを除いて無向である。また少なくとも1つ以上のエージェントは自分とリーダーとの相対姿勢 $R_0^T R_i (= E_i)$ が分かるものとする。
- 4.リーダーの姿勢 R_0 は不変である。

仮定1より

・ $R_i = R_j = R_0 \quad \forall i, j$
 となればリーダー追尾を達成
 $R_0 \in SO(3)$ リーダーの姿勢



6. 制御則の提案

・制御入力

リーダとの相対姿勢誤差ベクトル

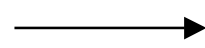
$$\omega_i = \underbrace{\sum_{j \in N_i} e_R(R_i^T R_j)}_{\text{通信可能な他のエージェントとの相対姿勢誤差ベクトルの総和}} + \underbrace{c_i e_R(R_i^T R_0)}_{\text{リーダとの相対姿勢誤差ベクトル}} \dots(2)$$

$$c_i = \begin{cases} 1 & \text{エージェント } i \text{ とリーダとの相対姿勢の情報を得ることができるとき} \\ 0 & \text{エージェント } i \text{ とリーダとの相対姿勢の情報を得ることができないとき} \end{cases}$$

通信可能な他のエージェントとの相対姿勢誤差ベクトルの総和

$$\omega_i = \underbrace{\sum_{j \in N_i} e_R(R_i^T R_j)}_{\text{通信可能な他のエージェントとの相対姿勢誤差ベクトルの総和}}$$

通信可能な他のエージェントとの相対姿勢誤差ベクトルの総和

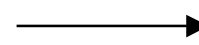


群れ(Flocking)を達成 (*1)



リーダとの相対姿勢誤差ベクトル

$$+ \underbrace{c_i e_R(R_i^T R_0)}_{\text{リーダとの相対姿勢誤差ベクトル}}$$



リーダ追尾を達成？



7. 証明

・リアプノフ関数

$$V = \sum_{i=1}^n \phi(R_0^T R_i) = \sum_{i=1}^n \phi(E_i)$$

$$* \phi(R_i) = \frac{1}{2} \text{tr}(I - R_i)$$

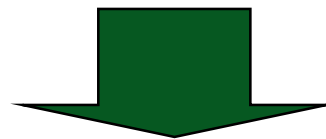
・リアプノフ関数の時間微分

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^n \dot{\phi}(E_i)$$

* 仮定2、3、4を用いて。

$$= -\frac{1}{4} \sum_{i \sim j} \text{tr}\{(E_i + E_j + E_i + E_j)(I - E_i^T E_j)\} - \sum_{i=1}^n c_i e_R^T(E_i) e_R(E_i)$$

$$\leq 0$$



$$R_i = R_0 \quad \forall i \quad \text{のとき} \quad \dot{V} = 0$$

$$R_i = R_0 \quad \forall i \quad \text{as} \quad t \rightarrow \infty$$



8. シミュレーション

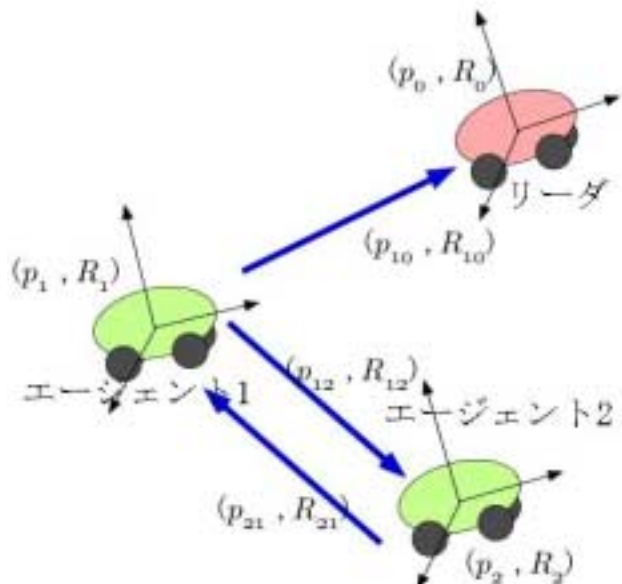


Fig. システムのグラフ構造

・初期姿勢・位置

$$R_0(0) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad p(0) = \begin{bmatrix} 1 \\ 4 \\ 3 \end{bmatrix}$$

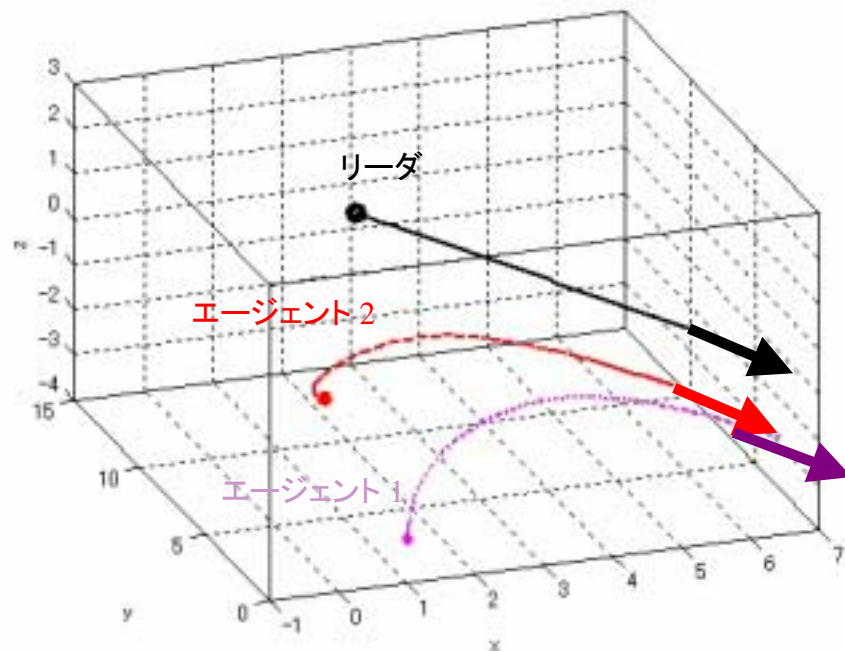
$$R_1(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad p(1) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -3 \end{bmatrix}$$

$$R_2(0) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad p(2) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

・制御入力

$$\omega_1 = e_R(R_1^T R_2) + e_R(R_1^T R_0)$$

$$\omega_2 = e_R(R_2^T R_1)$$



Mov : 各エージェントの位置の軌跡

・リーダ追尾を達成している



9. 検証実験A(1)

・天井カメラと実機を用いた検証実験



Fig. 実験風景



Fig. 実機

- ・天井カメラから実機の向き(2次元空間での姿勢)を観測(Halcon)。
- ↓
- ・パソコンでそれぞれの実機への制御入力を計算し(simulink)、実機の信号送信機に電圧を入力する(Dspace)。



10. 検証実験A(2)

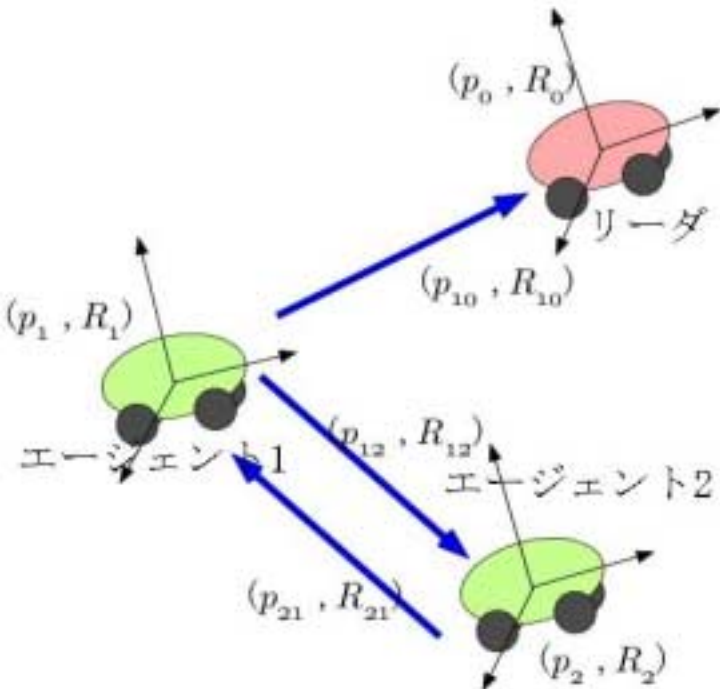


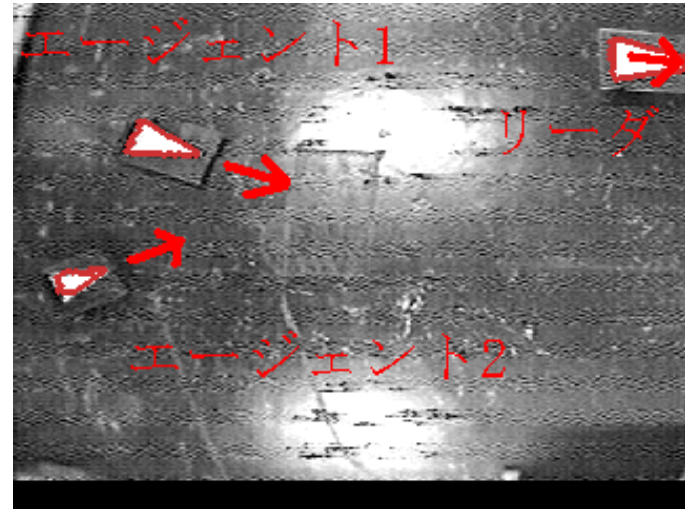
Fig.システムのグラフ構造

・制御入力

$$\omega_1 = K_1 \{e_R(R_1^T R_2) + e_R(R_1^T R_0)\}$$

$$\omega_2 = K_2 e_R(R_2^T R_1)$$

* K_i : 正のゲイン



Mov.天井カメラの映像

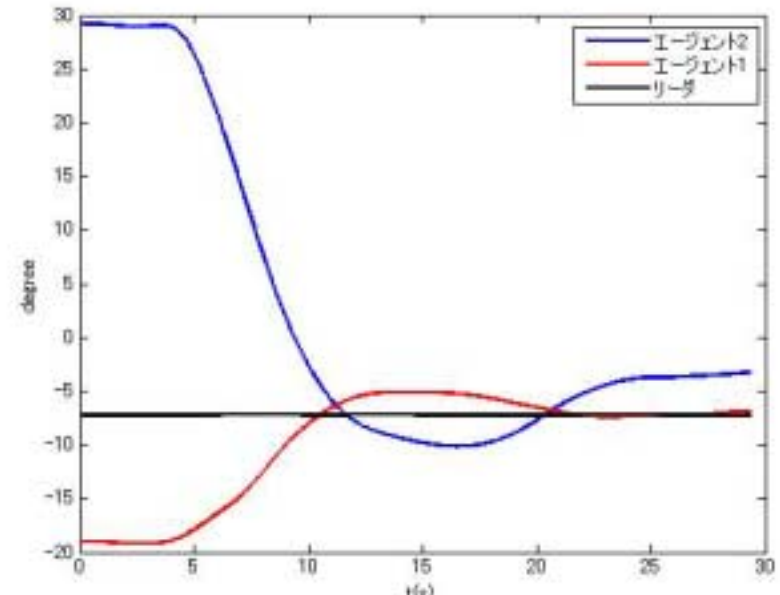


Fig.姿勢(向き)の推移



11. 検証実験A(3)

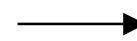
- ・ほぼ同じ姿勢(向き)に収束



- ・リーダー追尾をほぼ達成。

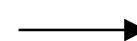
- ・完全に同じ姿勢にならない理由

- ・実機の正確な同定ができておらず
また電波のノイズがかなりあり、
実機に正確な各速度入力を加え
られていない。



- ・実機の同定を含む実験
環境の整備。

- ・天井カメラの視野が狭く、その中で
収束に至るのが難しい。



- ・角速度入力のゲインを
適度に大きくする。



12. 相対位置姿勢を推定するオブザーバ

・目標

- ・天井カメラを用いず各エージェントにカメラを搭載し、視覚情報を基にリーダーや他のエージェントとの相対位置姿勢を推定するオブザーバ(*3)を導入することにより、リーダー追尾を達成する自立エージェントを実現する。

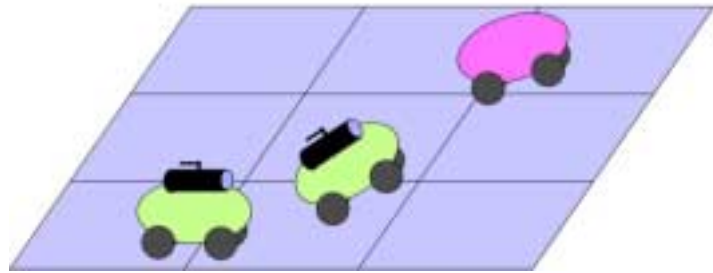


Fig.カメラを搭載した自立エージェント

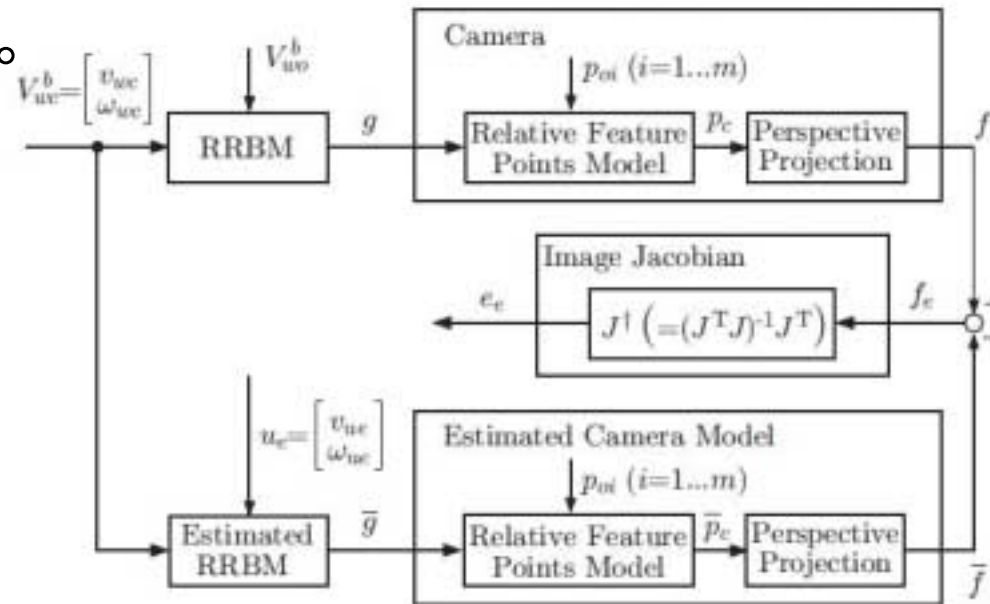


Fig.オブザーバの構成

・オブザーバの仕組み

- ・対象物に設けた4つ以上の特徴点をカメラで撮影し、画像上での特徴点の実際の座標と推定された座標との偏差をフィードバックに組み込み、その推定偏差をなくすことにより相対位置姿勢を推定する。



13. 検証実験B(1)

・オブザーバの検証実験



Fig.実験の様子

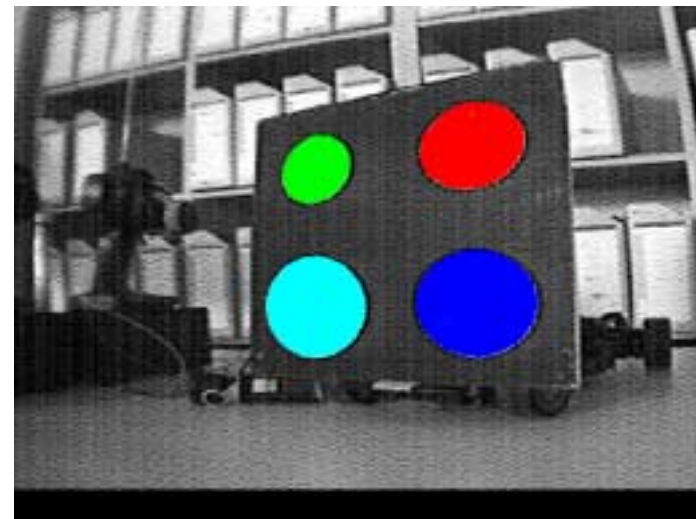


Fig.カメラ画像

- ・カメラで対象物を(特徴点がすべて含まれるように)撮影。
- ↓
- ・特徴点の(カメラ画像平面上での)座標を計測(Halcon)。
- ↓
- ・オブザーバで相対姿勢を推定(Simulink)。



14. 検証実験B(2)

・結果

- ・精度があまりよくない。

・原因

- ・ピンホールカメラを用いているため、画像が歪む。
- ・画像上での特徴点の座標を正確に計測できていない。(画像上での輝度を基準に画像処理し計測しているため照明をうまく調節しなければならない)
- ・オブザーバの構築時に近似計算をしているので、あまり相対姿勢の差が大きくなると推定偏差が大きくなる。

・今後の対策

- ・ピンホールカメラではなく、レンズカメラを用いて実験する。
- ・照明環境を改善する(暗室で特徴点にLEDを用いて実験するなど)。
- ・姿勢誤差の小さい範囲でオブザーバを適用する。



15. おわりに

- ・本発表のまとめ
 - ・リーダ追尾問題を達成する制御則の提案
 - ・相対位置姿勢を推定するオブザーバの紹介
 - ・シミュレーション、検証実験
- ・今後の課題
 - ・実験環境の整備
 - ・オブザーバの精度を上げ、天井カメラを用いず個々のエージェントにカメラを搭載し、自立エージェントを実現する



16. 参考文献

- [1] 五十嵐裕司, 藤田政之, “群れ行動の協調制御に関する一考察—受動性アプローチ,” 第35回 SICE制御理論シンポジウム資料, pp.197-200, 大阪, 2006.
- [2] Nima Moshtagh, Ali Jadbabaie and Kostas Daniilidis, “Vision-based Distributed Coordination and Flocking of Multi-agent Systems,” Robotics: Science and Systems II, pp.41-48. MIT Press, 2005.
- [3] M.Fujita, H.Kawai and M.W.Spong, “Passivity-based Dynamic Visual Feedback Control for Three Dimensional Target Tracking: Stability and L2-gain Performance Analysis,” IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.15, No.1, pp.1-13, 2007.



・リーダ追尾問題に関する定理

キネマティクス(1)を持ち仮定1,2,3を充たすシステムにおいて、各エージェントに入力(2)を加えるとリーダ追尾が達成される。

・証明

リアプノフ関数の候補 V を次のようにとる。

$$V = \sum_{i=1}^n \phi(R_0^T R_i) = \sum_{i=1}^n \phi(E_i) \quad * \phi(R_i) = \frac{1}{2} \text{tr}(I - R_i)$$

V の時間微分を考える。

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sum_{i=1}^n \dot{\phi}(E_i) \\ &= \sum_{i=1}^n e_R^T(E_i) \omega_i = \dots \end{aligned}$$



付録. 定理と証明(2)

$$\begin{aligned}\dot{V} &= \sum_{i=1}^n e_R^T(E_i) \omega_i \\ &= \sum_{i=1}^n e_R^T(E_i) \left\{ \sum_{j \in N_i} e_R(E_i^T E_j) + c_i e_R(E_i^T) \right\}\end{aligned}$$

ここでリーダを除いてグラフは無向と仮定している(仮定1)

$$= \sum_{i \sim j} \{e_R^T(E_i) - e_R^T(E_j)\} e_R(E_i^T E_j) - \sum_{i=1}^n c_i e_R^T(E_i) e_R(E_i)$$

任意の3次元ベクトル a, b に対して $a^T b = -\frac{1}{2} \text{tr}(\hat{a}\hat{b})$ が成り立つので

$$= -\frac{1}{2} \sum_{i \sim j} \text{tr} \left\{ \{e_R(E_i) - e_R(E_j)\}^\wedge \{e_R(E_i^T E_j)\}^\wedge \right\} - \sum_{i=1}^n c_i e_R^T(E_i) e_R(E_i)$$

$$= -\frac{1}{8} \sum_{i \sim j} \text{tr} \left\{ \{(E_i - E_i^T) - (E_j - E_j^T)\} (E_i^T E_j - E_j^T E_i) \right\} - \sum_{i=1}^n c_i e_R^T(E_i) e_R(E_i)$$

$$= -\frac{1}{4} \sum_{i \sim j} \text{tr} \left\{ (E_i^T + E_j)(I - E_i^T E_j) \right\} - \sum_{i=1}^n c_i e_R^T(E_i) e_R(E_i) = \dots$$



$$\dot{V} = -\frac{1}{4} \sum_{i \sim j} \text{tr} \left\{ (E_i^T + E_j)(I - E_i^T E_j) \right\} - \sum_{i=1}^n c_i e_R^T(E_i) e_R(E_i)$$

ここで $\text{tr} \left\{ (E_i + E_j^T)(I - E_i^T E_j) \right\} = \text{tr}(E_i - E_j + E_j^T - E_j^T E_i^T E_j) = 0$ なので

$$= -\frac{1}{4} \sum_{i \sim j} \text{tr} \left\{ (E_i + E_i^T + E_j + E_j^T)(I - E_i^T E_j) \right\} - \sum_{i=1}^n c_i e_R^T(E_i) e_R(E_i)$$

今リーダとの相対姿勢 $E_i = R_i^T R_0$ は正定と仮定しており(仮定2)、
また任意の準正定行列 A, B に対して

$\left\{ \lambda_{\min}(B + B^T) \right\} \text{tr}(A) \leq \text{tr} \left\{ (B + B^T) A \right\}$ が成り立つので

$$\leq -\frac{1}{4} \sum_{i \sim j} \left\{ \left\{ \lambda_{\min}(E_i + E_i^T + E_j + E_j^T) \right\} \left\{ \text{tr}(I - E_i^T E_j) \right\} \right\} - \sum_{i=1}^n c_i e_R^T(E_i) e_R(E_i)$$

$$\leq 0$$



$$\dot{V} \leq 0$$

ここで $\dot{V} = 0$ となるのは $E_i = E_j \quad \forall (i, j) \in E$ and $e_R(E_i) = 0 \quad \forall (i | c_i = 1)$ の時である。

今グラフはリーダを含めて連結、また少なくとも1つ以上のエージェントが自分とリーダとの相対姿勢 E_i が分かると仮定しているので(仮定3)、 $\dot{V} = 0$ となるのは結局 $R_i = R_0 \quad \forall i$ の時である。よって

*LaSalle*の不変原理を用いて

$$R_i = R_0 \quad \forall i \quad \text{as } t \rightarrow \infty$$

となることが分かる。今各エージェントとリーダのボディ速度は等しく、変化しないと仮定しているので(仮定1)、すべてのエージェントの姿勢がリーダの姿勢と等しくなるということはすなわちリーダ追尾が達成されることと等しい。

よって上で $R_i = R_0 \quad \forall i \quad \text{as } t \rightarrow \infty$ が証明されたので、すなわちリーダ追尾が達成されることが証明された。