論文の内容の要旨

論文題目　宇宙構造物における自律分散概念に関する研究

氏名　石村 康生

自律分散概念は巨大・複雑システムの構築において有効性が期待されており，工学・生物学・経済学など様々な分野での概念研究がなされてきた．一般的に，自律分散システムとは，「各サブシステムが自律的に行動し，全体として大域的秩序を形成・維持するシステムである」と定義される．この自律的なサブシステムを agent と呼ぶ．独立した agent の集合としてシステムが構成されるため，システムの容易な拡張，処理の並列化，優れた耐故障性などが期待される．しかし，従来の研究では実現例が偏っており，これらの有効性の考察も不十分である．汎用性のある統一理論の構築のためにも，新たな実現例の提示を行い，自律分散についての知見を深める必要がある．対象を宇宙構造物の分野に移すと，自律分散概念の導入が進んでいるとは言いがたい．また，自律分散システムの持つ耐故障性などの特徴は宇宙構造物においても重要であると考えられる．そこで，本研究では宇宙構造物の分野に自律分散概念の導入を試み，その有効性について考察する．

1 章は序論であり，広く今までの自律分散概念の研究を概観した．

2 章では，まず，宇宙構造物において，ミッション側の要求から巨大化・複雑化の傾向があることを幾つかの事例から確かめた．構造物の巨大化・複雑化は，地上試験の困難さ，制御における処理負荷の増大，信頼性の低下など様々な問題を生じさせる．現在，これらの解法としてモジュール構造など構造物の分散化がある．しかし，これらの分散化の研究では，モジュール間の相互作用の考慮に欠けている．そこで，宇宙構造物に対する自律分散概念の導入を提案する．

以下の章では，まず，複雑な構造物として可変形状トラスを挙げ，自律分散制御を試み，その有効性について論じる．次に得られた知見をもとに，各 agent 間の変形量を平均化する相互作用に焦点をあてて研究を行う．平均化の相互作用を実現するために，熱伝導現象における平均化の性質を利用した制御方法を提案する．最後に，モジュール型構造物の展開制御に対しても，熱伝導現象の性質の利用を試み，その汎用性について考察を行う．

3 章では，自律分散概念の導入の有効性について，可変形状トラスのエンドエフェクタの制御を例に論じた．拡張性，処理速度，耐故障性の 3 つの点に関する検討を行った．拡張性については，構成要素数を変化させた場合にも本制御モデルにより対応が可能であり，拡張性に問題が無いことを確かめた．処理速度については提案する自律分散制御則によって並列処理が可能であることを示した．また，逆運動学に基づく制御則と比較して，提案する自律分散制御の方が，モジュール数が増大した場合に計算速度に関して優位であることを明らかにした(図 1)．耐故障性については，幾つかの故障 agent が存在する場合でも，提案する制御則によって，エンドエフェクタの位置・姿勢制御が可能であることを示した．さらに，各 agent の制御則に変形量を平均化する相互作用を組み込むことで，障害物の回避可能能力が増大することが分かった(図 2)．この結果から，自律分散において平均化の相互作用の考慮が重要である事がわかる．

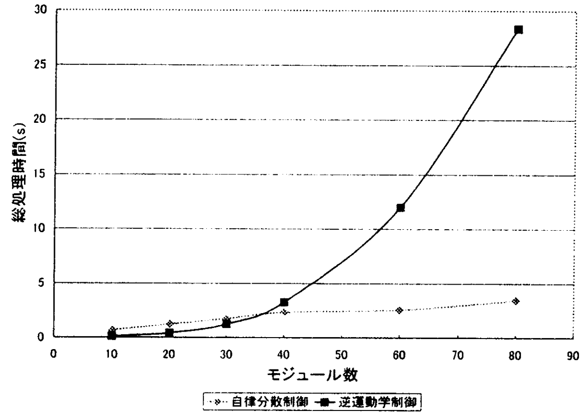


図 1　処理時間とモジュール数の関係

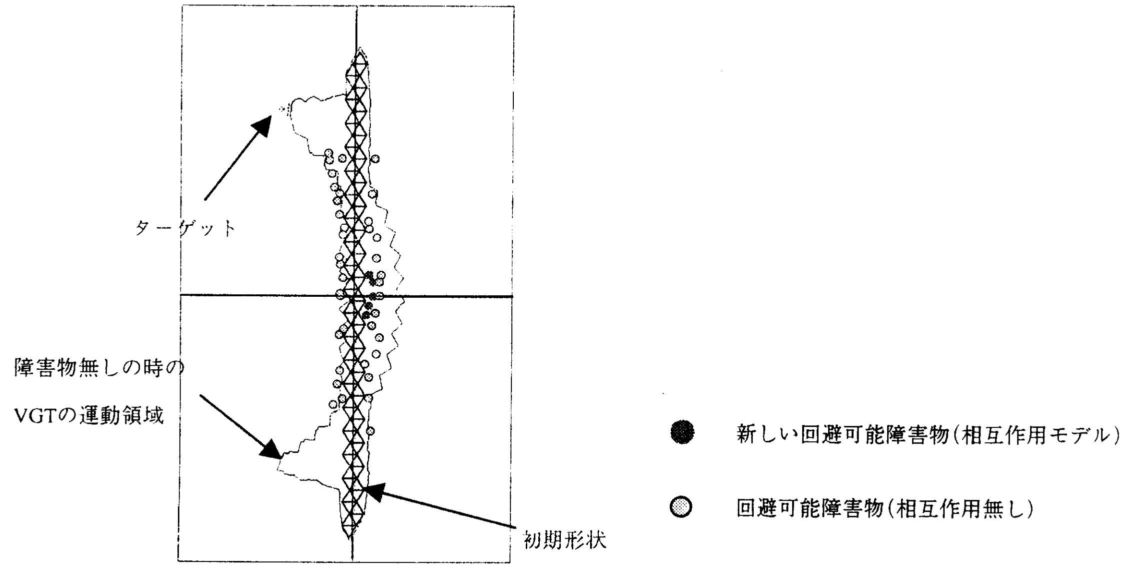


図 2　回避可能障害物範囲

4 章では，引き続き可変形状トラスを例に，平均化の相互作用に焦点をあてて研究を行った．単純化のために，可変形状トラスを冗長マニピュレータへ変換した．手先の位置制御において，各リンクのリンクベクトル $r_i(t)$ の平均化を試み，その平均化の指針として熱伝導方程式の利用を提案した．具体的には，熱伝導方程式(式 1)における温度 $T(x,t)$ をリンクベクトル $r_i(t)$ と置き換えることで，熱伝導型の制御則(式 2)を構築した．比較対象として波動方程式に基づく制御則も提案した．数値計算により，これらの制御則によってターゲットへの手先の位置制御が可能であることを確かめた．熱伝導型の制御則に関してはリャプノフの安定性理論に基づき安定性の評価を行い，漸近安定な制御を行えることを示した．最後に，障害物回避問題を含む数値計算を行い，提案する制御則により，ターゲットへの位置制御及び障害物回避が可能であることを確かめた(図 3)．熱伝導型制御では，変形の平均化がその本質であるため，最終形状において障害物に沿った一様なリンクベクトルを実現できた．一方，波動型制御では，手先の agent の軌跡に沿って他の agent が追従するため，障害物回避が手先側の agent のみの回避によって実現できた．以上，可変形状トラスを対象に熱伝導という物理現象を手本に平均化の相互作用の組み込みを行い，その有効性を示した．しかし，この相互作用について一般的な見解を述べるには，さらにその他の対象につ

いても考察を行うべきであろう．

熱伝導方程式の差分形式

$$\dot{T}(x,t)=\frac{\lambda(T(x+\Delta x,t))(T(x+\Delta x,t)-T(x,t))-\lambda(T(x,t))(T(x,t)-T(x-\Delta x,t))}{\Delta x^2} \tag{1}$$

熱伝導型の制御則

$$\begin{cases} \dot{r}_{1\mathbf{heat}}^{0}(t)=\lambda_1(r_2^0(t)-r_1^0(t)) \\ \dot{r}_{i\mathbf{heat}}^{0}(t)=\lambda_i(r_{i+1}^0(t)-r_i^0(t))-\lambda_{i-1}(r_i^0(t)-r_{i-1}^0(t)) \qquad (i=2,\cdots,n-1) \\ \dot{r}_{n\mathbf{heat}}^{0}(t)= \qquad\qquad -\lambda_{n-1}(r_n^0(t)-r_{n-1}^0(t)) \end{cases} \tag{2}$$

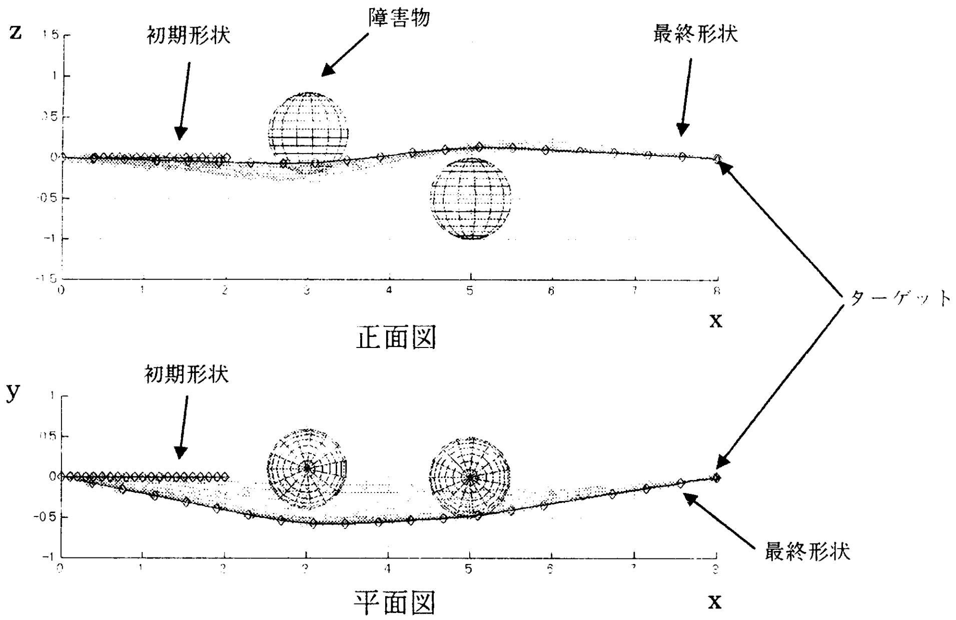


図 3　障害物回避挙動(熱伝導制御)

平均化の相互作用が重要な役割を果たすものとして，モジュール型構造の同時展開が考えられる．4 章の可変形状トラスは複雑な構造物の一つとして捉えることができたが，モジュール型構造物は巨大構造物の分散化の実例の一つとして捉えることができる．5 章ではこのモジュール型展開構造物を対象に，まず平均化の相互作用を解析し，次に熱伝導現象を利用した制御を試みた．ここでは，展開の同期を平均化として捉えた．モジュール型展開構造物として，単純な展開構造であるシングルアコーディオン折りの弾性パネル及びダブルアコーディオン折りの弾性パネルを考察した．はじめに，各サブシステムが展開力を持つモジュール型構造を考え，人工的な制御力を加えない場合の自然発生的な相互作用による展開の同期性について考察した．数値計算の結果，人工的な制御力を加えない場合は非同期挙動が生じることが明らかになった．この非同期挙動は，周囲のモジュールから受ける慣性力がモジュールの位置によって異なる事が原因である．ダブルアコーディオン折りの例においては，剛性と同期性の関係を調べ，剛性を上げることで同期性が向上することを確かめた．次に，シングルアコーディオン折りの例に対して，前章と同様に熱伝

導方程式を利用した同期制御を試みた．シングルアコーディオン折りの場合は，各関節の角度θ_iが各モジュールの展開進行度を表す．熱伝導方程式の差分式を参考に，局所的な角度差をフィードバックする制御を提案した(式 3)．ここで，フィードバックゲインξが熱伝導係数に対応する．数値計算により，提案する熱伝導型の制御則が同期性の向上をもたらす事を示した(図 4, 5)．このことから，提案する熱伝導方程式の利用は，平均化という相互作用の組み込みにおいて汎用性があるといえる．最後に，限られた条件下ではあるが，同期性の向上により重心移動が安定することや歪の局在化が防げることを確かめた．

熱伝導型フィードバック

$$\begin{cases} \tau_{c2} = \xi\left(\theta_2 - \theta_1\right) \\ \tau_{ci+1} = (-1)^{i+1}\left[\xi\left(\theta_{i+1} - \theta_i\right) + \xi\left(\theta_{i-1} - \theta_i\right)\right] & (i = 2, \cdots, N-2) \\ \tau_{cN} = (-1)^N\left[\xi\left(\theta_{N-1} - \theta_N\right)\right] \end{cases} \tag{3}$$

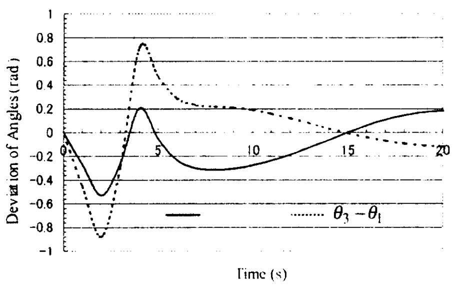
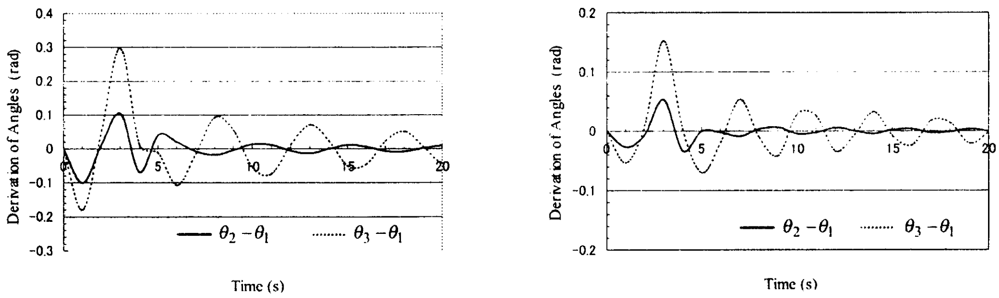


図 4　展開角度偏差　(同期制御なし)



ξ ＝4.5　　ξ ＝9

図 5　展開角度偏差　(同期制御時)

6 章は，結論である．

以上のことから，本論文により，

1. 宇宙構造物に自律分散概念を導入することにより，限られた対象ではあるが，優れた拡張性，並列処理，耐故障性が実現可能であり，有効であること
2. 各 agent が持つ規則の構築に，熱伝導方程式が表す性質を利用することで，平均化の相互作用が実現できること

が明らかにされた．