

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	空間素構造物の数の総合とその空間閉ループリンク機構の運動解析・設計への応用
Title(English)	Number synthesis of spatial prime structures and their applications to kinematic analysis and design of spatial closed-loop link mechanisms
著者(和文)	有賀嵩紘
Author(English)	Takahiro Aruga
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第259号, 授与年月日:2025年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:岩附 信行,武田 行生,岡田 昌史,遠藤 玄,菅原 雄介
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第259号, Conferred date:2025/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

# 空間素構造物の数の総合と その空間閉ループリンク機構の運動解析・設計への応用

(Number synthesis of spatial prime structures and their applications to kinematic analysis and design of spatial closed-loop link mechanisms)

東京科学大学 工学院 機械系 機械コース

有賀 嵩紘 (Takahiro Aruga)

本論文は、「空間素構造物の数の総合とその空間閉ループリンク機構の運動解析・設計への応用」と題し、以下の6章から成る。

第1章「緒論」では、本研究の研究背景、従来研究および研究目的を述べる。研究背景として、複雑な入出力関数や空間軌道を生成できる1自由度空間リンク機構や高速・高剛性のマニピュレータとなる多自由度空間パラレル機構など、空間閉ループリンク機構の活用が期待されているものの、その系統的な運動解析手法が確立されておらず、新たな機構設計への展開が進んでいない。他方、平面閉ループリンク機構では、自由度零の平面リンク連鎖中の1節を取り外し、その節を接続していた対偶を運動が既知である他の節に接続することで新たな平面リンク機構が構成できる「平面素構造物」が提案され、それに基づく系統的な平面リンク機構の運動解析手法が構築されている。平面素構造物は内部に0自由度以下の部分連鎖を有しない平面構造物であり、例として図1(a), (b)のような平面素構造物が存在する。また、図1(c)のような構造物は内部に0自由度部分連鎖(図1(a)の平面素構造物に一致)を含むため、素構造物でない。

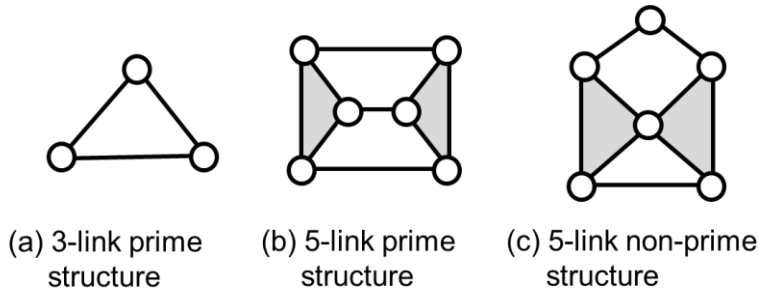


Fig.1 Planar prime structures

本研究では、この平面素構造物を空間リンク連鎖に拡張した「空間素構造物」の数の総合を行うとともに、得られた空間素構造物の由来連鎖の運動解析手法を構築し、それらを空間閉ループリンク機構の運動解析と設計に応用することを研究目的とする。

第2章「空間素構造物の数の総合」では、空間素構造物を網羅的に数え上げる。自由度3以下の対偶を有する自由度零の空間リンク連鎖中の節数と対偶数の条件式を求めたのち、節接続や対偶自由度の配置の組み合わせを網羅的に列挙して空間素構造物の候補を抽出し、それらの候補について、グラフ理論における双対グラフを用いて網羅的に部分連鎖を列挙してその自由度の計算を行い、内部に自由度零以下の部分連鎖を有するものを排除する。例えば、図2(a)の素構造物候補(対偶部の数字は対偶自由度を表す)の部分連鎖を網羅的に列挙すると図2(b)-(d)の部分連鎖が得られるが、それらのうち図2(d)の部分連鎖は自由度が0であるため、図2(a)の連鎖は素構造物でないものとして数の総合で除外する。さらに、連鎖の隣接行列の要素配置を網羅的に調査してトポロジーの同一性の判定を行い、重複する候補を排除する。最後に、球対偶のみからなる2対偶素節に起因する余剰自由度を有する自由度1以上の空間素構造物についても網羅的に列挙する。例として、図3のような連鎖( $S_1S_2$ 節が直線 $S_1S_2$ まわりの余剰自由度を有する)が余剰自由度を有する素構造物として列挙される。結果として、3節、4節、5節の空間素構造物をそれぞれ3種、13種、97種求めた。

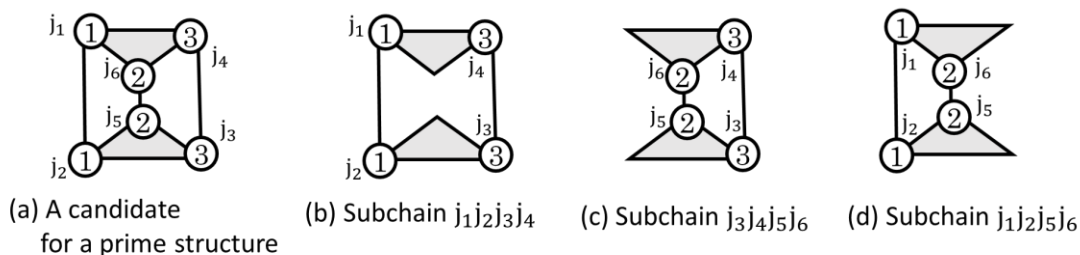


Fig.2 An example of the rigid subchain detection

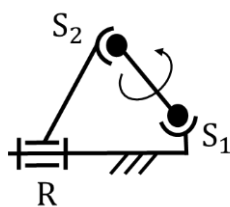


Fig.3 A prime structure with an idle DoF

第3章「空間素構造物由来連鎖の運動解析」では、空間素構造物由来連鎖の運動解析手法を構築する。全ての3節素構造物および一部の4、5節素構造物について、その1節上の各対偶の位置・姿勢とその時間微分値が与えられたとき、他のすべての対偶の位

置・姿勢とその時間微分値を，可能な限り代数的に求める手法を示す．単ループ素構造物由来連鎖と複ループ素構造物由来連鎖について，その運動解析手法に関してそれぞれ 2 グループに分類し，単ループ連鎖については，2 つの空間図形の交点として球対偶変位を求めることで変位解析を行う手法と，閉回路方程式から一元の代数方程式を立式して解く変位解析手法を示す．一部の複ループ連鎖については，1 つのループについて余剰自由度を有する素構造物を用いた変位解析を適用したのち，2 つの球対偶の 2 対偶素節を回転対偶に置き換え他のループの解析を行う手法を示す．他の複ループ連鎖については 1 つの対偶変位を変数とした一元の高次代数方程式を立式する手法を示す．さらに，一つの素構造物から得られる複数の由来連鎖について，そのうち 1 種類の由来連鎖について運動解析手法を構築すれば，座標変換により他の由来連鎖についても運動解析が可能であることを明らかにする．例として，図 4(a)の RCS 素構造物から図 4(b)-(d)に示す 3 種類の素構造物由来連鎖が得られるが，そのうち 1 種類の連鎖について運動解析手法を構築すれば，座標変換を用いることで他の 2 種類の連鎖についても運動解析が可能となる．また，すべての変位解析が代数的に行われているか，高次代数方程式を解く問題に帰着されているため，解析式の時間微分もしくは高次代数方程式の時間微分を用いることにより，連鎖中の対偶の位置・姿勢の時間微分値が容易に計算可能となる．

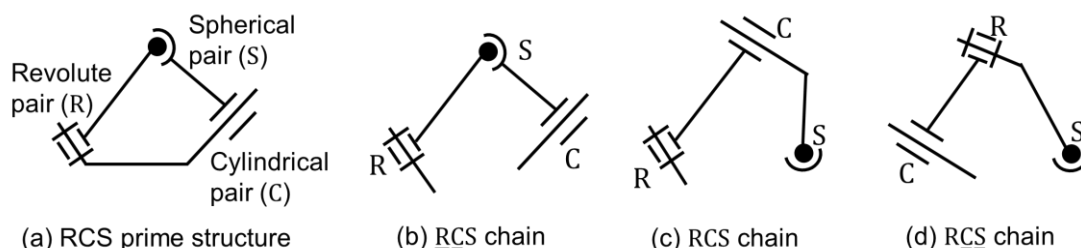
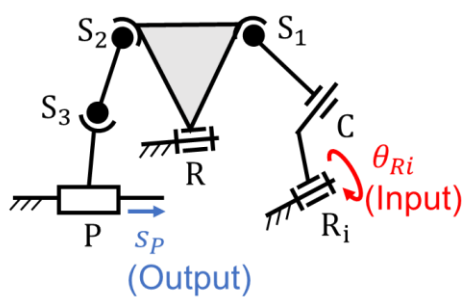
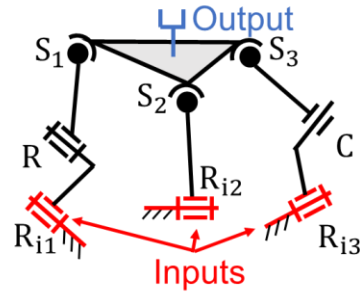


Fig.4 RCS prime structures and induced chains

第 4 章「空間素構造物を用いた空間機構の運動解析」では，空間素構造物由来連鎖の運動解析手法を用いた空間閉ループリンク機構の運動解析を行う．まず，順運動学解析では入力運動を，逆運動学解析では出力運動を与えて得られる構造物中の空間素構造物を検出し，それらの空間素構造物由来連鎖の運動解析を適用していく機構の解析手順を構築する．例として，1 自由度 RCS-R-PSS 空間 6 節機構(図 5(a))の順運動学解析および 3 自由度 RRS-RS-RCS 空間 7 節機構(図 5(b))の順／逆運動学解析を行い，前者については，変位解析結果の 3D-CAD 計算結果との比較，ならびに速度・加速度解析結果と変位解析結果の数値微分値との比較により解析手法の妥当性を明らかにし，後者については，試作機構を用いた実験により，正確な解析が行われていることを示す．



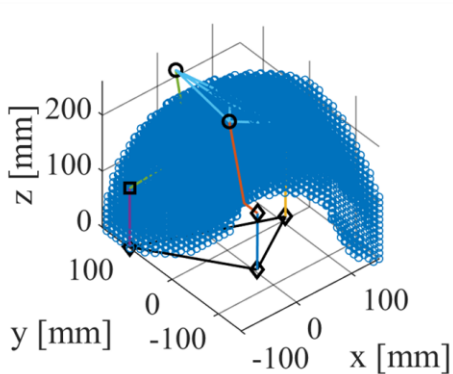
(a) 1-DoF RCS-R-PSS mechanism



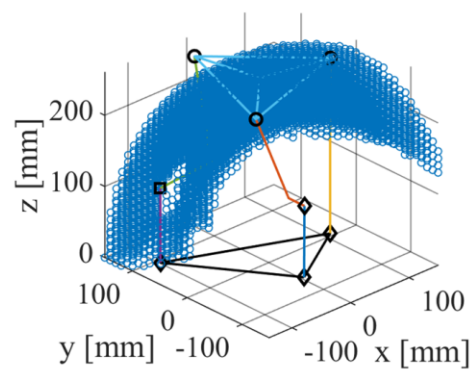
(b) 3-DoF RCS-RS-RRS mechanism

Fig.5 RCS-R-PSS mechanism and RCS-RS-RRS mechanism

第5章「空間素構造物を用いた空間機構設計」では、空間素構造物を応用した空間閉ループリンク機構の運動解析に基づき、機構設計を行う。まず1自由度 RCS-R-PSS 空間6節機構について、圧力角を運動伝達性の評価指標とする最適設計を行う。次に3自由度 RRS-RS-RCS 空間7節機構について、出力点の作業領域を最大化する最適設計を行うとともに、運動解析における代数方程式の解の存在条件を調べることで、作業領域の境界が機構中の部分連鎖の運動限界や機構の特異姿勢に相当することを判別可能であることを示す。図6に、RRS-RS-RCS 機構の設計結果を示す。図6において青色の丸印は機構出力点の到達可能点を表し、図6(a)が最適設計により得られた機構定数の機構における作業領域を、図6(b)に比較対象とする機構の作業領域を示す。図6より、最適設計により機構の作業領域が拡大したことが確認できた。



(a) Workspace of the optimal mechanism



(b) Workspace of a mechanism for comparison

Fig.6 The result of the workspace-maximization design

第6章「結論」では、本研究で得られた結果を要約するとともに、今後の研究の展望について述べる。