

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)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	機械 機械	系 コース	申請学位 (専攻分野)： 博士 Academic Degree Requested Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	有賀 嵩紘		審査員主査： Chief Examiner	岩附 信行

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

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平行機構など、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。そこで本研究では、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。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。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。

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。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。

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節機構の順運動学解析および3自由度 RRS-RS-RCS 空間7節機構の順／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。

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により、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。

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。

備考：論文要旨は、和文2000字と英文300語を1部ずつ提出するか、もしくは英文800語を1部提出してください。

Note: Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東京科学大学リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Science Tokyo Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	機械 機械	系 コース	申請学位(専攻分野)： 博士 Academic Degree Requested Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	有賀 嵩紘		審査員主査： Chief Examiner	岩附 信行

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

This research aims to enable the systematic kinematic analysis and design of spatial closed-loop link mechanisms by using the spatial prime structures, which are structures which do not contain subchains with 0 degrees of freedom (DoF) or less. This dissertation consists of the following 6 chapters.

Chapter 1 describes the backgrounds and objectives of this research.

Chapter 2 describes the number synthesis of spatial prime structures. After deriving the relation between the numbers of links and pairs, the topology of link connection and the topology of pair arrangement are enumerated exhaustively, and non-prime structures and isomorphic structures are eliminated. Resultantly, 3, 13 and 97 kinds of spatial prime structures including those with idle DoF for 3, 4 and 5 links, respectively, are synthesized.

Chapter 3 describes the kinematic analysis of link chains induced from spatial prime structures. When the positions and orientations of each pair on one link in several synthesized spatial prime structures are given, the motions of all other pairs are calculated. For single-loop prime structures, an algebraic equation with one variable is derived from some geometric conditions, and the motion can be calculated by solving the equation. For multi-loop prime structures, the motion can be analyzed by applying several single-loop prime structures.

Chapter 4 describes the kinematic analysis of spatial closed-loop link mechanisms based on spatial prime structures. For forward kinematics, when the DoFs of input pairs are given, the remaining chain is a spatial structure. For inverse kinematics, when 3- or 6-DoFs of the output link are virtually constrained, the remaining chain is a structure.

Then, by applying the method in Chapter 3 to these structures, the motions of the mechanisms are analyzed. For examples, the motions of 1-DoF RCS-R-PSS mechanism and 3-DoF RRS-RS-RCS mechanism are analyzed, and the results are validated with 3D-CAD or experiments with a prototype.

Chapter 5 describes the design of spatial closed-loop link mechanisms based on kinematic analyses with spatial prime structures. The optimal designs to maximize the motion transmissibility of 1-DoF RCS-R-PSS mechanism, and to maximize the workspace of 3-DoF RRS-RS-RCS mechanism, are shown.

Chapter 6 concludes the obtained results in this research and the future prospects of this research.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東京科学大学リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Science Tokyo Research Repository Website (T2R2).