

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2018-176406

(P2018-176406A)

(43) 公開日 平成30年11月15日(2018.11.15)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
B 2 5 J 13/00 (2006.01)	B 2 5 J 13/00 Z	2 H 0 4 0
A 6 1 B 1/005 (2006.01)	A 6 1 B 1/005 5 2 2	3 C 7 0 7
G 0 2 B 23/24 (2006.01)	A 6 1 B 1/005 5 2 3	4 C 1 6 1
	A 6 1 B 1/005 5 2 4	
	G 0 2 B 23/24 A	
審査請求 未請求 請求項の数 13 O L (全 36 頁)		

(21) 出願番号 特願2017-84877 (P2017-84877)
(22) 出願日 平成29年4月21日 (2017. 4. 21)

(71) 出願人 000001007
キヤノン株式会社
東京都大田区下丸子3丁目30番2号
(74) 代理人 100090273
弁理士 國分 孝悦
(72) 発明者 ▲高▼木 清志
東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キ
ヤノン株式会社内
Fターム(参考) 2H040 BA21 DA03 DA19 DA21 EA00
3C707 AS35 BS20 HT04 LV15 LV19
4C161 CC06 FF32 HH32 HH39 HH47

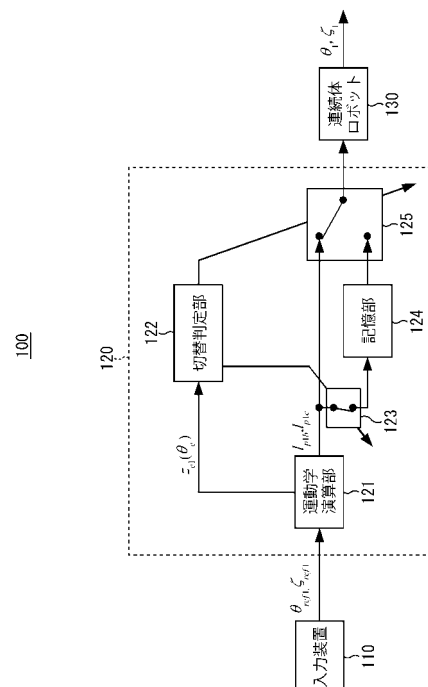
(54) 【発明の名称】 連続体ロボットの制御システム及びその制御方法、並びに、プログラム

(57) 【要約】

【課題】連続体ロボットの湾曲部を駆動させる際に、当該湾曲部の湾曲形状の基準面となる部材と当該湾曲部内の最も基準面に近い部材との接触を防止する仕組みを提供する。

【解決手段】切替判定部122は、運動学演算部121で算出された、湾曲部の湾曲形状の基準面となる部材と当該湾曲部内の最も基準面に近い部材との距離を表す距離情報である座標値 $z_{e1}(\theta_e)$ に応じて、当該座標値とともに運動学演算部121で算出された当該湾曲部を駆動させるためのワイヤの駆動変位置に基づくワイヤの駆動を行うか否かを判定する。

【選択図】図1



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

基準面を介して延伸する複数のワイヤと、

前記複数のワイヤが異なる位置に固定され、前記複数のワイヤを案内する第 1 のワイヤガイドと、

前記基準面と前記第 1 のワイヤガイドとの間に設けられ、前記複数のワイヤのうち一部のワイヤが固定された、前記複数のワイヤを案内する第 2 のワイヤガイドとを含み形成され、

前記複数のワイヤのうち少なくとも一部の所定ワイヤを駆動することにより湾曲可能な湾曲部を、有する連続体ロボットの制御システムであって、

前記湾曲部の湾曲角度の目標値である目標湾曲角度および当該湾曲部の旋回角度の目標値である目標旋回角度の入力に応じて、前記所定ワイヤの駆動変位量と、前記第 2 のワイヤガイドにおける前記基準面に近い側の端部である近位端と当該基準面との距離を表す距離情報とを算出する算出手段と、

前記所定ワイヤの駆動を制御する制御手段と、を有し、

前記制御手段は、前記距離情報とともに前記算出手段で算出された前記駆動変位量に基づいて前記所定ワイヤの駆動を行うか否かを、前記距離情報に応じて判定する判定手段を有することを特徴とする連続体ロボットの制御システム。

【請求項 2】

前記制御手段は、前記距離情報が閾値以下であった場合、当該距離情報とともに前記算出手段で算出された前記駆動変位量に基づく前記所定ワイヤの駆動を行わないように制御することを特徴とする請求項 1 に記載の連続体ロボットの制御システム。

【請求項 3】

前記制御手段は、前記距離情報が閾値以下であった場合、予め記憶部に記憶されている前記所定ワイヤの駆動変位量に基づく前記所定ワイヤの駆動を行う制御をすることを特徴とする請求項 1 に記載の連続体ロボットの制御システム。

【請求項 4】

前記制御手段は、前記距離情報が前記閾値以下であった場合、予め記憶部に記憶されている前記所定ワイヤの駆動変位量に基づく前記所定ワイヤの駆動を行う制御をすることを特徴とする請求項 2 に記載の連続体ロボットの制御システム。

【請求項 5】

前記記憶部に記憶されている前記所定ワイヤの駆動変位量は、前記距離情報が前記閾値以下でなかった場合に当該距離情報とともに前記算出手段により算出された前記駆動変位量であることを特徴とする請求項 3 または 4 に記載の連続体ロボットの制御システム。

【請求項 6】

前記湾曲部は、複数の前記第 2 のワイヤガイドを含んで構成され、

前記算出手段は、前記距離情報として、前記複数の第 2 のワイヤガイドのうち前記基準面に最も近い第 2 のワイヤガイドにおける前記近位端と当該基準面との距離を表す距離情報を算出することを特徴とする請求項 1 乃至 5 のいずれか 1 項に記載の連続体ロボットの制御システム。

【請求項 7】

前記少なくとも一部の所定ワイヤは複数の所定ワイヤを有し、

前記算出手段は、当該複数の所定ワイヤを構成するワイヤごとに前記駆動変位量を算出することを特徴とする請求項 1 乃至 6 のいずれか 1 項に記載の連続体ロボットの制御システム。

【請求項 8】

前記湾曲部の長さは、当該湾曲部の湾曲形状に応じて変化することを特徴とする請求項 1 乃至 7 のいずれか 1 項に記載の連続体ロボットの制御システム。

【請求項 9】

前記連続体ロボットの長軸方向に直列に複数の前記湾曲部が構成され、

10

20

30

40

50

前記算出手段は、前記複数の湾曲部の湾曲部ごとに、前記所定ワイヤの駆動変位量と前記距離情報とを算出し、

前記制御手段は、前記複数の湾曲部の湾曲部ごとに、前記制御を行うことを特徴とする請求項 1 乃至 8 のいずれか 1 項に記載の連続体ロボットの制御システム。

【請求項 1 0】

前記第 2 のワイヤガイドは、前記複数のワイヤのうちの前記所定ワイヤを除く他のワイヤが所定の位置に固定されていることを特徴とする請求項 1 乃至 9 のいずれか 1 項に記載の連続体ロボットの制御システム。

【請求項 1 1】

前記湾曲部は、前記複数のワイヤのうちの全部のワイヤを前記所定ワイヤとして駆動することにより湾曲可能に構成されていることを特徴とする請求項 1 乃至 9 のいずれか 1 項に記載の連続体ロボットの制御システム。

【請求項 1 2】

基準面を介して延伸する複数のワイヤと、前記複数のワイヤが異なる位置に固定され、前記複数のワイヤを案内する第 1 のワイヤガイドと、前記基準面と前記第 1 のワイヤガイドとの間に設けられ、前記複数のワイヤのうちの一部のワイヤが固定された、前記複数のワイヤを案内する第 2 のワイヤガイドとを含み形成され、前記複数のワイヤのうちの少なくとも一部の所定ワイヤを駆動することにより湾曲可能な湾曲部を、有する連続体ロボットの制御方法であって、

前記湾曲部の湾曲角度の目標値である目標湾曲角度および当該湾曲部の旋回角度の目標値である目標旋回角度の入力に応じて、前記所定ワイヤの駆動変位量と、前記第 2 のワイヤガイドにおける前記基準面に近い側の端部である近位端と当該基準面との距離を表す距離情報とを算出する算出ステップと、

前記距離情報とともに前記算出ステップで算出された前記駆動変位量に基づいて前記所定ワイヤの駆動を行うか否かを、前記距離情報に応じて判定する判定ステップと、

を有することを特徴とする連続体ロボットの制御方法。

【請求項 1 3】

請求項 1 乃至 1 1 のいずれか 1 項に記載の連続体ロボットの制御システムにおける各手段としてコンピュータを機能させるためのプログラム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0 0 0 1】

本発明は、連続体ロボットの制御システム及びその制御方法、並びに、当該制御システムとしてコンピュータを機能させるためのプログラムに関するものである。

【背景技術】

【0 0 0 2】

連続体ロボットは、コンティニュームロボットとも呼ばれ、柔軟性のある構造を持つ湾曲部を有し、その湾曲部を変形させることにより形状が制御される。この連続体ロボットは、剛体リンクにより構成されるロボットに対して、主に 2 つの優位性を持つ。1 つ目は、連続体ロボットは、剛体リンクロボットがはまり込んでしまうような狭い空間や散乱物のある環境の中で、曲線に沿って移動可能である。2 つ目は、連続体ロボットは、本質的な柔らかさを有するため、脆弱な対象物に損傷を与えることなく操作することができる。そこでは、剛体リンクロボットで必要とされる外力の検出などは必ずしも必要とされない。

【0 0 0 3】

この特徴を生かし、連続体ロボットは、内視鏡のシースやカテーテルなどの医療の分野や、レスキューロボットなどの極限作業ロボットへの応用が期待されている。この連続体ロボットの駆動方法としては、腱駆動によるもの、押引き可能なワイヤによるもの、空気アクチュエータによるものなどがある。非特許文献 1 では、3 本のワイヤと、それをガイドするベースディスク、スペーサーディスク、エンドディスクにより連続体ロボットを構

10

20

30

40

50

成し、運動学を導出することでワイヤの押し引き駆動量を求め、形状の制御を行っている。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0004】

【非特許文献1】K. Xu, M. Fu, and J. Zhao, "An Experimental Kinestatic Comparison between Continuum Manipulators with Structural Variations," in IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Hong Kong, China, 2014, pp. 3258-3264.

【発明の概要】

10

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

非特許文献1では、それぞれのディスクの円周の近くにワイヤをガイドする孔が設けられている。また、非特許文献1では、運動学の導出においては、連続体ロボットの中心を通る仮想的なワイヤを考え、その長さが常に一定となるように実際のワイヤの駆動量を求めている。そのため、非特許文献1では、或る湾曲部の湾曲形状の基準面となる部材と当該湾曲部内の最も基準面に近い部材とが接触をしてしまうおそれがあった。

【0006】

本発明は、このような問題点に鑑みてなされたものであり、連続体ロボットの湾曲部を駆動させる際に、当該湾曲部の湾曲形状の基準面となる部材と当該湾曲部内の最も基準面に近い部材との接触を防止する仕組みを提供することを目的とする。

20

【課題を解決するための手段】

【0007】

本発明の連続体ロボットの制御システムは、基準面を介して延伸する複数のワイヤと、前記複数のワイヤが異なる位置に固定され、前記複数のワイヤを案内する第1のワイヤガイドと、前記基準面と前記第1のワイヤガイドとの間に設けられ、前記複数のワイヤのうちの一部のワイヤが固定された、前記複数のワイヤを案内する第2のワイヤガイドとを含み形成され、前記複数のワイヤのうちの少なくとも一部の所定ワイヤを駆動することにより湾曲可能な湾曲部を、有する連続体ロボットの制御システムであって、前記湾曲部の湾曲角度の目標値である目標湾曲角度および当該湾曲部の旋回角度の目標値である目標旋回角度の入力に応じて、前記所定ワイヤの駆動変位量と、前記第2のワイヤガイドにおける前記基準面に近い側の端部である近位端と当該基準面との距離を表す距離情報とを算出する算出手段と、前記所定ワイヤの駆動を制御する制御手段と、を有し、前記制御手段は、前記距離情報とともに前記算出手段で算出された前記駆動変位量に基づいて前記所定ワイヤの駆動を行うか否かを、前記距離情報に応じて判定する判定手段を有する。

30

また、本発明は、上述した連続体ロボットの制御方法、及び、上述した連続体ロボットの制御システムとしてコンピュータを機能させるためのプログラムを含む。

【発明の効果】

【0008】

本発明によれば、連続体ロボットの湾曲部を駆動させる際に、当該湾曲部の湾曲形状の基準面となる部材と当該湾曲部内の最も基準面に近い部材との接触を防止することができる。

40

【図面の簡単な説明】

【0009】

【図1】本発明の第1の実施形態に係る連続体ロボットの制御システムの構成例を示す模式図である。

【図2】図1に示す連続体ロボットの構成例を示す模式図である。

【図3】図2に示すワイヤの配置をx-y面において定義するための模式図である。

【図4】図2に示す連続体ロボットの湾曲部をw-z面へ投影した場合の一例を示す模式図である。

50

【図 5】本発明の第 1 の実施形態に係る連続体ロボットの制御システムによる制御方法の処理手順の一例を示すフローチャートである。

【図 6】本発明の第 1 の実施形態を示し、各旋回角度と最大湾曲角度との関係をシミュレーションした結果を示す図である。

【図 7】本発明の第 2 の実施形態に係る連続体ロボットの制御システムの構成例を示す模式図である。

【図 8】図 7 に示す連続体ロボットの構成例を示す模式図である。

【図 9】図 7 に示す連続体ロボットの湾曲形状の一例を示す図である。

【図 10】本発明の第 2 の実施形態を示し、各旋回角度と最大湾曲角度との関係をシミュレーションした結果を示す図である。

【図 11】本発明の第 3 の実施形態に係る連続体ロボットの制御システムの構成例を示す模式図である。

【発明を実施するための形態】

【0010】

以下に、本発明の各実施形態について、図面を参照して詳細に説明する。本発明の実施形態では、連続体ロボット（連続体マニピュレータともいう）の制御システムが可撓性内視鏡に適用される例を示す。近年、例えば医療分野においては、患者の負担を低減し治療・検査後の QOL を向上させるための低侵襲医療が注目を集めており、低侵襲医療の例として、可撓性内視鏡を用いた手術・検査が挙げられる。可撓性内視鏡は、挿入部が湾曲可能な部材で構成されているため、内視鏡先端の湾曲部の湾曲角度を操作することで広い範囲をくまなく観察できる。なお、本発明の実施形態に係る連続体ロボットの制御システムの例として適用する可撓性内視鏡は、医療分野に限定されるものではなく、湾曲部を挿入・抜去させる経路（以下、「挿抜経路」を称する）の内部を観察するものであれば他の分野（例えば、配管等の内部を観察するための工業用内視鏡）にも適用可能である。

【0011】

（第 1 の実施形態）

まず、本発明の第 1 の実施形態について説明する。

【0012】

< 連続体ロボットの制御システムの構成例 >

図 1 は、本発明の第 1 の実施形態に係る連続体ロボットの制御システム 100 の構成例を示す模式図である。連続体ロボットの制御システム 100 は、図 1 に示すように、入力装置 110 と、制御装置 120 と、連続体ロボット 130 とを有して構成されている。

【0013】

連続体ロボットの構成例

まず、図 1 に示す連続体ロボット 130 の構成例について説明する。

図 2 は、図 1 に示す連続体ロボット 130 の構成例を示す模式図である。連続体ロボット 130 は、図 2 に示すように、基台部 1310 及び湾曲部 1320 を含み形成されている。また、図 2 に示す連続体ロボット 130 は、湾曲部 1320 の長軸方向に移動可能に構成されている。

【0014】

湾曲部 1320 は、当該湾曲部 1320 の基準面に相当する基台部 1310 の上面 1314 を介して延伸する複数のワイヤ 1301 ~ 1303 と、複数のワイヤ 1301 ~ 1303 が異なる位置に固定され、複数のワイヤ 1301 ~ 1303 を案内する第 1 のワイヤガイド 1321 と、基台部 1310 の上面 1314 と第 1 のワイヤガイド 1321 との間に設けられ、複数のワイヤ 1301 ~ 1303 のうちの一部のワイヤ 1301 が所定の位置に固定された、複数のワイヤ 1301 ~ 1303 を案内する第 2 のワイヤガイド 1322 ~ 1325 と、を含み形成されている。具体的に、第 1 のワイヤガイド 1321 は、位置 13211 にワイヤ 1301 が固定され、位置 13212 にワイヤ 1302 が固定され、位置 13213 にワイヤ 1303 が固定されている。また、第 2 のワイヤガイド 1322 は位置 13221 にワイヤ 1301 が固定され、第 2 のワイヤガイド 1323 は位置 1

10

20

30

40

50

3 2 3 1 にワイヤ 1 3 0 1 が固定され、第 2 のワイヤガイド 1 3 2 4 は位置 1 3 2 4 1 にワイヤ 1 3 0 1 が固定され、第 2 のワイヤガイド 1 3 2 5 は位置 1 3 2 5 1 にワイヤ 1 3 0 1 が固定されている。なお、図 2 に示すように、湾曲部 1 3 2 0 の基準面に相当する基台部 1 3 1 0 の上面 1 3 1 4 には、複数のワイヤ 1 3 0 1 ~ 1 3 0 3 は固定されていない。

【0015】

そして、図 2 に示す連続体ロボット 1 3 0 では、複数のワイヤ 1 3 0 1 ~ 1 3 0 3 のうちの一部の所定ワイヤであるワイヤ 1 3 0 2 及び 1 3 0 3 を駆動することにより、湾曲部 1 3 2 0 を所望の湾曲形状（例えば、円弧状）に湾曲可能に構成されている。

【0016】

ここで、以下の説明においては、湾曲部の各ワイヤガイドにおいて、当該湾曲部の長軸方向について当該湾曲部の基準面から遠い側の端部を「遠位端」と称し、当該湾曲部の基準面から近い側の端部を「近位端」と称する。具体的に、湾曲部 1 3 2 0 は、基台部 1 3 1 0 の上面 1 3 1 4（厳密に言えば、上面 1 3 1 4 自体は含まない）から第 1 のワイヤガイド 1 3 2 1 の遠位端 1 3 2 1 4 に至るまでとなっている。ここで、図 2 に示す例では、第 1 のワイヤガイド 1 3 2 1 の遠位端 1 3 2 1 4 の異なる位置 1 3 2 1 1 ~ 1 3 2 1 3 にそれぞれワイヤ 1 3 0 1 ~ 1 3 0 3 が固定されているものとする。また、例えば、ワイヤ 1 3 0 1 が固定される位置 1 3 2 2 1 ~ 1 3 2 5 1 は、それぞれ、第 2 のワイヤガイド 1 3 2 2 ~ 1 3 2 5 の近位端に設けられている。

【0017】

また、図 2 に示す連続体ロボット 1 3 0 は、第 1 のワイヤガイド 1 3 2 1 よりも上面 1 3 1 4 から遠い方にカメラ（不図示）が設けられており、湾曲部 1 3 2 0 を挿抜経路 4 0 0 に沿って挿入することにより、挿抜経路 4 0 0 の内部を観察可能となっている。なお、図 2 では、離散的に配置された複数のワイヤガイドを配置する例を示したが、蛇腹状やメッシュ状等の連続体のワイヤガイドを配置するようにしてもよい。

【0018】

基台部 1 3 1 0 の内部には、ワイヤ 1 3 0 2 を押し引き駆動させるためのアクチュエータ 1 3 1 1 と、ワイヤ 1 3 0 3 を押し引き駆動させるためのアクチュエータ 1 3 1 2 と、ワイヤ 1 3 0 1 の一端を固定する固定部 1 3 1 3 が設けられている。すなわち、図 2 に示す連続体ロボット 1 3 0 では、アクチュエータ 1 3 1 1 及びアクチュエータ 1 3 1 2 を制御してワイヤ 1 3 0 2 及び 1 3 0 3 を駆動することにより、湾曲部 1 3 2 0 を所望の湾曲形状（例えば、円弧状）に湾曲可能に構成されている。

【0019】

また、図 2 には、連続体ロボット 1 3 0（より詳細に、図 2 に示す例では湾曲部 1 3 2 0）の中心軸 1 3 0 4 を破線で示している。また、図 2 では、湾曲部 1 3 2 0 の基準面に相当する基台部 1 3 1 0 の上面 1 3 1 4 について、その中心を原点 O とするとともに、その面内で原点 O を通り相互に直交する x 軸及び y 軸を図示している。また、図 2 では、基台部 1 3 1 0 の上面 1 3 1 4 と直交する z 軸を図示している。また、図 2 では、アクチュエータ 1 3 1 1 によるワイヤ 1 3 0 2 の駆動変位量 l_{p1b} 、及び、アクチュエータ 1 3 1 2 によるワイヤ 1 3 0 3 の駆動変位量 l_{p1c} を図示している。また、図 2 では、第 1 のワイヤガイド 1 3 2 1 の遠位端 1 3 2 1 4 において、中心軸 1 3 0 4 が通る位置 1 3 2 1 5 を図示している。また、図 2 では、位置 1 3 2 1 5 において、中心軸 1 3 0 4 と z 軸と平行な線分とのなす角度を湾曲部 1 3 2 0 の湾曲角度 θ_1 として図示している。また、図 2 では、中心軸 1 3 0 4 を x y 面に投影した w 軸を図示し、また、位置 1 3 2 1 5 を x y 面に投影した位置 1 3 0 5 を図示している。また、図 2 では、x 軸と w 軸とのなす角度を湾曲部 1 3 2 0 の旋回角度 ζ_1 として図示している。また、図 2 では、中心軸 1 3 0 4 に係る湾曲部 1 3 2 0 の曲率半径 ρ_1 を図示している。また、図 2 では、第 1 のワイヤガイド 1 3 2 1 の遠位端 1 3 2 1 4 から第 2 のワイヤガイド 1 3 2 5 の近位端 1 3 2 5 2 までのワイヤ 1 3 0 1 の長さ l_{aw1} を図示している。

【0020】

10

20

30

40

50

ここで、再び、図 1 の説明に戻る。

入力装置 110 は、湾曲部 1320 の湾曲形状パラメータである、湾曲部 1320 の湾曲角度 θ_1 の目標値である目標湾曲角度 θ_{ref1} 、及び、湾曲部 1320 の旋回角度 ζ_1 の目標値である目標旋回角度 ζ_{ref1} を、制御装置 120 に対して入力する。また、入力装置 110 は、目標湾曲角度 θ_{ref1} 及び目標旋回角度 ζ_{ref1} からなる湾曲形状パラメータを時系列で（例えば、所定の離散時間ステップごとに）順次入力することが可能に構成されている。この際、入力装置 110 は、異なる値の目標湾曲角度 θ_{ref1} 及び目標旋回角度 ζ_{ref1} からなる湾曲形状パラメータを時系列で順次入力することも可能である。

【0021】

制御装置 120 は、入力装置 110 から入力された湾曲形状パラメータに応じて、連続体ロボット 130 の駆動制御を行う。この制御装置 120 は、図 1 に示すように、運動学演算部 121 と、切替判定部 122 と、第 1 の切替部 123 と、記憶部 124 と、第 2 の切替部 125 を有して構成されている。具体的に、制御装置 120 は、3 本のワイヤ 1301 ~ 1303 のうちの 2 本のワイヤ 1302 及び 1303 を駆動することにより立体的に形状の制御が可能な連続体ロボット 130 の運動学に基づくモデルを導出する。なお、本明細書において、運動学に基づくモデルを運動学とも称する。そして、制御装置 120 は、湾曲部 1320 の基準面に相当する基台部 1310 の上面 1314 と、基台部 1310 の上面 1314 に最も近い第 2 のワイヤガイド 1325 の近位端 13252 との接触を回避するための制御を行う。

【0022】

運動学演算部 121 は、入力装置 110 からの目標湾曲角度 θ_{ref1} 及び目標旋回角度 ζ_{ref1} の入力に応じて、ワイヤ 1302 の駆動変位量 l_{p1b} 及びワイヤ 1303 の駆動変位量 l_{p1c} を算出する。さらに、運動学演算部 121 は、目標湾曲角度 θ_{ref1} 及び目標旋回角度 ζ_{ref1} の入力に応じて、第 2 のワイヤガイド 1325 の近位端 13252 と基台部 1310 の上面 1314 との距離を表す距離情報である座標値 $z_{e1}(\theta_e)$ を算出する。ここで、座標値 $z_{e1}(\theta_e)$ は、基準面の原点 O を 0 の値とした z 軸方向の値を示しているものとする。また、座標値 $z_{e1}(\theta_e)$ は、図 2 に示す第 2 のワイヤガイド 1325 の近位端 13252 における外周上の全ての点の z 軸方向の値を示しているものとする。このワイヤ 1302 の駆動変位量 l_{p1b} 及びワイヤ 1303 の駆動変位量 l_{p1c} と、距離情報である座標値 $z_{e1}(\theta_e)$ を算出する運動学演算部 121 は、本発明の「算出手段」に相当する構成の一例である。

【0023】

切替判定部 122 は、当該座標値 $z_{e1}(\theta_e)$ とともに運動学演算部 121 で算出された駆動変位量 l_{p1b} 及び駆動変位量 l_{p1c} のそれぞれに基づいてワイヤ 1302 及び 1303 の駆動を行うか否かを、運動学演算部 121 で算出された座標値 $z_{e1}(\theta_e)$ に応じて判定する。具体的に、切替判定部 122 は、座標値 $z_{e1}(\theta_e)$ が閾値以下であるか否かを判断し、当該判断の結果に基づいて、上述した駆動制御を行う。ここで、閾値として、例えば 0 を設定すれば、座標値 $z_{e1}(\theta_e)$ が閾値である 0 以下の場合には、基台部 1310 の上面 1314 と第 2 のワイヤガイド 1325 の近位端 13252 とが接触することが想定される。この基台部 1310 の上面 1314 と第 2 のワイヤガイド 1325 の近位端 13252 との接触の観点からは、閾値として 0 を設定することが好適である。しかしながら、本発明においてはこの態様に限定されるものではなく、接触に係る安全率を考慮して、閾値として所定の正の値を設定する態様も、本発明に適用可能である。

【0024】

座標値 $z_{e1}(\theta_e)$ が閾値以下でない場合、切替判定部 122 は、基台部 1310 の上面 1314 と第 2 のワイヤガイド 1325 の近位端 13252 とが接触するおそれがないと判定し、第 1 の切替部 123 及び第 2 の切替部 125 を図 1 に示すように切り替える。具体的に、この場合、切替判定部 122 は、第 2 の切替部 125 を図 1 に示すように切り替えて、当該座標値 $z_{e1}(\theta_e)$ とともに運動学演算部 121 で算出された駆動変位量 l_{p1b} 及び駆動変位量 l_{p1c} を連続体ロボット 130 に出力する制御を行う。これにより、連

10

20

30

40

50

連続体ロボット 130 では、当該座標値 $z_{e1}(\theta_e)$ とともに運動学演算部 121 で算出された駆動変位量 l_{p1b} 及び駆動変位量 l_{p1c} のそれぞれに基づくワイヤ 1302 及び 1303 の駆動が行われることになる。また、この場合、切替判定部 122 は、第 1 の切替部 123 を図 1 に示すように切り替えて、当該座標値 $z_{e1}(\theta_e)$ とともに運動学演算部 121 で算出された駆動変位量 l_{p1b} 及び駆動変位量 l_{p1c} を記憶部 124 に記憶する制御を行う。このように、記憶部 124 には、座標値 $z_{e1}(\theta_e)$ が閾値以下でなかった場合（すなわち、接触するおそれが無いと判定された場合）に当該座標値 $z_{e1}(\theta_e)$ とともに運動学演算部 121 で算出された駆動変位量 l_{p1b} 及び駆動変位量 l_{p1c} が記憶される。

【0025】

一方、座標値 $z_{e1}(\theta_e)$ が閾値以下である場合、切替判定部 122 は、基台部 131 0 の上面 1314 と第 2 のワイヤガイド 1325 の近位端 13252 とが接触するおそれが有ると判定し、第 1 の切替部 123 及び第 2 の切替部 125 を図 1 に示すものと逆方向に切り替える。すなわち、この場合、切替判定部 122 は、当該座標値 $z_{e1}(\theta_e)$ とともに運動学演算部 121 で算出された駆動変位量 l_{p1b} 及び駆動変位量 l_{p1c} のそれぞれに基づくワイヤ 1302 及び 1303 の駆動を行わないように制御する。具体的に、この場合、まず、切替判定部 122 は、第 1 の切替部 123 を図 1 に示すものと逆方向に切り替えて、当該座標値 $z_{e1}(\theta_e)$ とともに運動学演算部 121 で算出された駆動変位量 l_{p1b} 及び駆動変位量 l_{p1c} を記憶部 124 に記憶しない制御を行う。これにより、記憶部 124 には、座標値 $z_{e1}(\theta_e)$ が閾値以下でなかった場合（すなわち、接触するおそれが無いと判定された場合）に当該座標値 $z_{e1}(\theta_e)$ とともに運動学演算部 121 で算出された駆動変位量 l_{p1b} 及び駆動変位量 l_{p1c} のみが記憶される。また、この場合、切替判定部 122 は、第 2 の切替部 125 を図 1 に示すものと逆方向に切り替えて、当該座標値 $z_{e1}(\theta_e)$ とともに運動学演算部 121 で算出された駆動変位量 l_{p1b} 及び駆動変位量 l_{p1c} を連続体ロボット 130 に出力しない制御を行う。これにより、連続体ロボット 130 では、当該座標値 $z_{e1}(\theta_e)$ とともに運動学演算部 121 で算出された駆動変位量 l_{p1b} 及び駆動変位量 l_{p1c} のそれぞれに基づくワイヤ 1302 及び 1303 の駆動が行われず、上述した接触を回避することができる。より詳細に、この場合、切替判定部 122 は、第 2 の切替部 125 を図 1 に示すものと逆方向に切り替えて、予め記憶部 124 に記憶されている、以前に運動学演算部 121 で算出され座標値 $z_{e1}(\theta_e)$ が閾値以下でなかった場合（すなわち、接触するおそれが無いと判定された場合）に当該座標値 $z_{e1}(\theta_e)$ とともに算出された駆動変位量 l_{p1b} 及び駆動変位量 l_{p1c} を連続体ロボット 130 に出力する制御を行う。これにより、連続体ロボット 130 では、上述した接触を回避しつつ、湾曲部 1320 の駆動が行われることになる。

【0026】

なお、本実施形態においては、記憶部 124 に、運動学演算部 121 で算出された所定の駆動変位量 l_{p1b} 及び駆動変位量 l_{p1c} を記憶するようにしているが、本発明においてはこの形態に限定されるものではない。例えば、運動学演算部 121 で算出されたものではなく、上述した接触を回避できることが検証された駆動変位量 l_{p1b} 及び駆動変位量 l_{p1c} を予め記憶しておく形態も、本発明に適用可能である。また、切替判定部 122 は、本発明の「判定手段」に相当する構成の一例である。

【0027】

図 1 に示す制御装置 120 の運動学演算部 121、切替判定部 122、第 1 の切替部 123、記憶部 124 及び第 2 の切替部 125 は、ハードウェアで構成されていても、ソフトウェアで構成されていてもよい。ここで、図 1 に示す制御装置 120 の各構成部 121 ~ 125 がソフトウェアで構成されている場合には、例えばコンピュータの CPU が ROM 等の記憶媒体に記憶されているプログラムを実行することにより、各構成部 121 ~ 125 の機能が実現される。

【0028】

次いで、制御装置 120 の具体的な処理例について説明する。

以下の説明では、原点 O から位置 13215 までの中心軸 1304 の長さを湾曲部 13

10

20

30

40

50

2 0 の中心軸の長さ l_{1d} とする。この湾曲部 1 3 2 0 の中心軸の長さ l_{1d} は、当該湾曲部 1 3 2 0 の湾曲形状に応じて変化する。また、第 1 のワイヤガイド 1 3 2 1 の遠位端 1 3 2 1 4 の座標を (x_{t1}, y_{t1}, z_{t1}) とする。また、ワイヤ 1 3 0 1 の長さを l_{1a} とし、また、 $x y$ 面内において反時計回りに順次配置されているワイヤ 1 3 0 2 及び 1 3 0 3 の長さをそれぞれ l_{1b} 及び l_{1c} とする。

【 0 0 2 9 】

さらに、本実施形態においては、 z 軸及び y 軸回りの回転行列を、それぞれ、以下に示すように、 $R_z(\theta)$ 及び、 $R_y(\theta)$ と表す。

【 0 0 3 0 】

【 数 1 】

$$R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}$$

10

【 0 0 3 1 】

また、制御装置 1 2 0 の具体的な処理例では、以下に示す仮定に基づき、連続体ロボットの運動学を導出する。

[1] 湾曲部 (湾曲部が複数ある場合には、各湾曲部) において、ワイヤは、曲率一定に変形する。

20

[2] ワイヤのねじり変形は考慮しない。

[3] ワイヤは、長手方向に変形しない。

[4] ワイヤガイドとワイヤとの間の摩擦は考慮しない。

【 0 0 3 2 】

本実施形態では、まず、湾曲部 1 3 2 0 の湾曲角度 θ_1 と第 1 のワイヤガイド 1 3 2 1 の遠位端 1 3 2 1 4 の座標 (x_{t1}, y_{t1}, z_{t1}) との関係を導出する。

【 0 0 3 3 】

湾曲部 1 3 2 0 の湾曲角度 θ_1 は、図 2 に示す $w z$ 面内の第 1 のワイヤガイド 1 3 2 1 の遠位端 1 3 2 1 4 における湾曲角度に相当する。ここで、 $w z$ 面内における湾曲部 1 3 2 0 の遠位端 1 3 2 1 4 の座標を w_{t1}, z_{t1} とすると、座標 w_{t1} 及び z_{t1} は、上述した湾曲部 1 3 2 0 の湾曲角度 θ_1 及び湾曲部 1 3 2 0 の曲率半径 ρ_1 を用いて、それぞれ、以下の (1) 式及び (2) 式で表すことができる。

30

【 0 0 3 4 】

【 数 2 】

$$w_{t1} = \rho_1(1 - \cos \theta_1) \quad \dots \quad (1)$$

$$z_{t1} = \rho_1 \sin \theta_1 \quad \dots \quad (2)$$

【 0 0 3 5 】

また、上述した湾曲部 1 3 2 0 の中心軸の長さ l_{1d} は、以下の (3) 式で表すことができる。

40

【 0 0 3 6 】

【 数 3 】

$$l_{1d} = \rho_1 \theta_1 \quad \dots \quad (3)$$

【 0 0 3 7 】

そして、この (3) 式を、上述した (1) 式及び (2) 式に代入すると、それぞれ、以下の (4) 式及び (5) 式が導かれる。

【 0 0 3 8 】

50

【数 4】

$$w_{t1} = \frac{l_{1d}}{\theta_1}(1 - \cos \theta_1) \quad \dots \quad (4)$$

$$z_{t1} = \frac{l_{1d}}{\theta_1} \sin \theta_1 \quad \dots \quad (5)$$

【0039】

ここで、本実施形態においては、3本のワイヤ1301～1303のうちの2本のワイヤ1302及び1303を駆動させることを考えると、旋回角度 ζ_1 の変動により湾曲部1320の中心軸の長さ l_{1d} が変動してしまい、(4)式及び(5)式では遠位端13214の座標が求まらない。そこで、本実施形態では、図3に示すようにx y面を用いてワイヤ1301～1303の配置を定義し、湾曲部1320の中心軸の長さ l_{1d} を求める。

10

【0040】

図3は、図2に示すワイヤ1301～1303の配置をx y面において定義するための模式図である。図3では、各ワイヤ1301～1303は、一片の長さが r_s の正三角形の頂点に配置されており、位相角 ξ_n (本実施形態では、位相角 ξ_1 とする)は各ワイヤ1301～1303の配置を決定する角度である。本実施形態では、 $\xi_1 = 0$ とする。

【0041】

ここで、連続体ロボット130の湾曲部1320をw z面へ投影することを考える。

20

図4は、図2に示す連続体ロボット130の湾曲部1320をw z面へ投影した場合の一例を示す模式図である。この図4において、図2に示す構成と同様の構成については同じ符号を付している。この図4に示す、ワイヤ1301のw z面における原点0からの距離 r_{1a} 、ワイヤ1302のw z面における原点0からの距離 r_{1b} 、及び、ワイヤ1303のw z面における原点0からの距離 r_{1c} は、それぞれ、以下の(6-1)式、(6-2)式及び(6-3)式のように表せる。

【0042】

【数 5】

$$r_{1a} = \frac{r_s}{\sqrt{3}} \cos \zeta_1 \quad \dots \quad (6-1)$$

30

$$r_{1b} = \frac{r_s}{\sqrt{3}} \cos\left(\frac{\pi}{3} + \zeta_1\right) \quad \dots \quad (6-2)$$

$$r_{1c} = \frac{r_s}{\sqrt{3}} \cos\left(\frac{\pi}{3} - \zeta_1\right) \quad \dots \quad (6-3)$$

【0043】

ここで、固定ワイヤであるワイヤ1301の長さは不変であるため、ワイヤ1301の長さを l_{1a} は、図4と(6-1)式により、以下の(7)式のように表せる。

【0044】

40

【数 6】

$$l_{1a} = (\rho_1 - r_{1a})\theta_1 = \left(\rho_1 - \frac{r_s}{\sqrt{3}} \cos \zeta_1\right) \theta_1 \quad \dots \quad (7)$$

【0045】

これより、w z面における湾曲部1320の中心軸の長さ l_{1d} は、以下の(8)式のように表せる。

【0046】

【数 7】

$$l_{1d} = \rho_1 \theta_1 = l_{1a} + \frac{r_s}{\sqrt{3}} \cos \zeta_1 \theta_1 \quad \dots \quad (8)$$

【0047】

この(8)式を、上述した(4)式及び(5)式に代入すると、それぞれ、以下の(9)式及び(10)式が導かれる。

【0048】

【数 8】

10

$$w_{t1} = \frac{l_{1a}}{\theta_1} (1 - \cos \theta_1) - \frac{r_s}{\sqrt{3}} \cos \zeta_1 \cos \theta_1 \quad \dots \quad (9)$$

$$z_{t1} = \left(\frac{l_{1a}}{\theta_1} + \frac{r_s}{\sqrt{3}} \cos \zeta_1 \right) \sin \theta_1 \quad \dots \quad (10)$$

【0049】

これより、xyz空間における第1のワイヤガイド1321の遠位端13214の座標(x_{t1} , y_{t1} , z_{t1})は、それぞれ、以下の(11)式～(13)となる。

【0050】

20

【数 9】

$$x_{t1} = \left\{ \frac{l_{1a}}{\theta_1} (1 - \cos \theta_1) - \frac{r_s}{\sqrt{3}} \cos \zeta_1 \cos \theta_1 \right\} \cos \zeta_1 \quad \dots \quad (11)$$

$$y_{t1} = \left\{ \left(\frac{l_{1a}}{\theta_1} + \frac{r_s}{\sqrt{3}} \cos \zeta_1 \right) \sin \theta_1 \right\} \sin \zeta_1 \quad \dots \quad (12)$$

$$z_{t1} = \left(\frac{l_{1a}}{\theta_1} + \frac{r_s}{\sqrt{3}} \cos \zeta_1 \right) \sin \theta_1 \quad \dots \quad (13)$$

【0051】

30

なお、ワイヤ1302の長さ l_{1b} 、及び、ワイヤ1303の長さ l_{1c} は、それぞれ、以下の(14)式及び(15)となる。

【0052】

【数 10】

$$l_{1b} = l_{1a} + (r_{1a} + r_{1b})\theta_1 = l_{1a} + r_s \cos\left(\frac{\pi}{6} + \zeta_1\right)\theta_1 \quad \dots \quad (14)$$

$$l_{1c} = l_{1a} + (r_{1a} + r_{1c})\theta_1 = l_{1a} + r_s \cos\left(\frac{\pi}{6} - \zeta_1\right)\theta_1 \quad \dots \quad (15)$$

【0053】

40

本実施形態では、第1のワイヤガイド1321の遠位端13214の中心座標に加えて、遠位端13214から長さ l_{aw1} においてワイヤ1301に固定されている第2のワイヤガイド1325の近位端13252の外周上の座標(x_{e1} , y_{e1} , z_{e1})を求める。

【0054】

この際、上述したワイヤ1301の長さ l_{1a} 及び長さ l_{aw1} を用いて長さ l_{w1} と、更には、湾曲部1320の湾曲角度 θ_1 を用いて角度 θ_{w1} とを、以下の(16)式のように定義する。

【0055】

【数 1 1】

$$l_{w1} = l_{1a} - l_{aw1}, \theta_{w1} = \frac{l_{w1}}{l_{1a}} \theta_1 \quad \dots \quad (16)$$

【0 0 5 6】

そして、この(16)式の関係を用いて、第2のワイヤガイド1325の近位端13252における中心座標(x_{e10} , y_{e10} , z_{e10})は、以下の(17)式~(19)式となる。

【0 0 5 7】

10

【数 1 2】

$$x_{e10} = \left\{ \frac{l_{w1}}{\theta_{w1}} (1 - \cos \theta_{w1}) - \frac{r_s}{\sqrt{3}} \cos \zeta_1 \cos \theta_{w1} \right\} \cos \zeta_1 \quad \dots \quad (17)$$

$$y_{e10} = \left\{ \left(\frac{l_{w1}}{\theta_{w1}} + \frac{r_s}{\sqrt{3}} \cos \zeta_1 \right) \sin \theta_{w1} \right\} \sin \zeta_1 \quad \dots \quad (18)$$

$$z_{e10} = \left(\frac{l_{w1}}{\theta_{w1}} + \frac{r_s}{\sqrt{3}} \cos \zeta_1 \right) \sin \theta_{w1} \quad \dots \quad (19)$$

【0 0 5 8】

20

このことから、第2のワイヤガイド1325の近位端13252における外周上の座標は、以下の(20)式のようになる。なお、(20)式において、角度 θ_e は、(21)式に示す範囲を採る。

【0 0 5 9】

【数 1 3】

$$\begin{bmatrix} x_{e1}(\theta_e) \\ y_{e1}(\theta_e) \\ z_{e1}(\theta_e) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{e10} \\ y_{e10} \\ z_{e10} \end{bmatrix} + R_z(\zeta_1) R_y(\theta_1) \begin{bmatrix} r_{wg} \cos \theta_e \\ r_{wg} \sin \theta_e \\ 0 \end{bmatrix} \quad \dots \quad (20)$$

30

$$0 \leq \theta_e \leq 2\pi \quad \dots \quad (21)$$

【0 0 6 0】

次いで、湾曲部1320におけるワイヤ1302の駆動変位量 l_{p1b} 及びワイヤ1303の駆動変位量 l_{p1c} と湾曲部1320の湾曲角度 θ_1 との関係を導出する。wz面内において、湾曲部1320のみを考えると、ワイヤ1302の駆動変位量 l_{p1b} と湾曲部1320の湾曲角度 θ_1 との関係、及び、ワイヤ1303の駆動変位量 l_{p1c} と湾曲部1320の湾曲角度 θ_1 との関係は、それぞれ、以下の(22)式及び(23)式となる。

【0 0 6 1】

40

【数 1 4】

$$l_{p1b} = (r_{1a} + r_{1b}) \theta_1 = r_s \cos\left(\frac{\pi}{6} + \zeta_1\right) \theta_1 \quad \dots \quad (22)$$

$$l_{p1c} = (r_{1a} + r_{1c}) \theta_1 = r_s \cos\left(\frac{\pi}{6} - \zeta_1\right) \theta_1 \quad \dots \quad (23)$$

【0 0 6 2】

運動学演算部121は、入力装置110から目標湾曲角度 θ_{ref1} 及び目標旋回角度 ζ_{ref1} が入力されると、これらをそれぞれ、(22)式及び(23)式の θ_1 及び ζ_1 に代入して、駆動変位量 l_{p1b} 及び駆動変位量 l_{p1c} を算出する。さらに、運動学演算部121は、

50

(1 6) 式に示す長さ l_{aw1} を設定して、(1 6) 式 ~ (2 0) 式を用いることにより、(2 0) 式に示す座標値 $z_{e1}(\theta_e)$ を算出する。

【 0 0 6 3 】

< 連続体ロボットの制御方法の処理手順例 >

次に、本実施形態に係る連続体ロボットの制御システム 1 0 0 による制御方法の処理手順の一例について説明する。

図 5 は、本発明の第 1 の実施形態に係る連続体ロボットの制御システム 1 0 0 による制御方法の処理手順の一例を示すフローチャートである。

【 0 0 6 4 】

まず、ステップ S 1 0 1 において、運動学演算部 1 2 1 は、入力装置 1 1 0 から目標湾曲角度 θ_{ref1} 及び目標旋回角度 ζ_{ref1} の入力を受け付ける。そして、入力装置 1 1 0 から目標湾曲角度 θ_{ref1} 及び目標旋回角度 ζ_{ref1} が入力されると、ステップ S 1 0 2 に進む。

【 0 0 6 5 】

ステップ S 1 0 2 に進むと、運動学演算部 1 2 1 は、ステップ S 1 0 1 で入力された目標湾曲角度 θ_{ref1} 及び目標旋回角度 ζ_{ref1} に応じて、ワイヤ 1 3 0 2 の駆動変位量 l_{p1b} 及びワイヤ 1 3 0 3 の駆動変位量 l_{p1c} を算出する。

【 0 0 6 6 】

続いて、ステップ S 1 0 3 において、運動学演算部 1 2 1 は、ステップ S 1 0 1 で入力された目標湾曲角度 θ_{ref1} 及び目標旋回角度 ζ_{ref1} に応じて、第 2 のワイヤガイド 1 3 2 5 の近位端 1 3 2 5 2 と基台部 1 3 1 0 の上面 1 3 1 4 との距離を表す距離情報である座標値 $z_{e1}(\theta_e)$ を算出する。

【 0 0 6 7 】

続いて、ステップ S 1 0 4 において、切替判定部 1 2 2 は、ステップ S 1 0 3 で算出された座標値 $z_{e1}(\theta_e)$ が閾値以下であるか否かを判断する。

【 0 0 6 8 】

ステップ S 1 0 4 の判断の結果、ステップ S 1 0 3 で算出された座標値 $z_{e1}(\theta_e)$ が閾値以下でない場合には (S 1 0 4 / N o)、ステップ S 1 0 5 に進む。このステップ S 1 0 5 に進む場合とは、切替判定部 1 2 2 によって、基台部 1 3 1 0 の上面 1 3 1 4 と第 2 のワイヤガイド 1 3 2 5 の近位端 1 3 2 5 2 とが接触するおそれが無いと判定された場合である。

【 0 0 6 9 】

ステップ S 1 0 5 に進むと、切替判定部 1 2 2 は、第 1 の切替部 1 2 3 を図 1 に示すように切り替えて、ステップ S 1 0 2 で算出された駆動変位量 l_{p1b} 及び駆動変位量 l_{p1c} を第 1 の切替部 1 2 3 を介して記憶部 1 2 4 に記憶する制御を行う。同時に、切替判定部 1 2 2 は、第 2 の切替部 1 2 5 を図 1 に示すように切り替えて、ステップ S 1 0 2 で算出された駆動変位量 l_{p1b} 及び駆動変位量 l_{p1c} を第 2 の切替部 1 2 5 を介して連続体ロボット 1 3 0 に出力する制御を行う。また、記憶部 1 2 4 には、上述した接触のおそれが無い駆動変位量 l_{p1b} 及び駆動変位量 l_{p1c} が記憶される。

【 0 0 7 0 】

一方、ステップ S 1 0 4 の判断の結果、ステップ S 1 0 3 で算出された座標値 $z_{e1}(\theta_e)$ が閾値以下である場合には (S 1 0 4 / Y e s)、ステップ S 1 0 6 に進む。このステップ S 1 0 6 に進む場合とは、切替判定部 1 2 2 によって、基台部 1 3 1 0 の上面 1 3 1 4 と第 2 のワイヤガイド 1 3 2 5 の近位端 1 3 2 5 2 とが接触するおそれが有ると判定された場合である。

【 0 0 7 1 】

ステップ S 1 0 6 に進むと、切替判定部 1 2 2 は、第 2 の切替部 1 2 5 を図 1 に示すものと逆方向に切り替えて、ステップ S 1 0 2 で算出された駆動変位量 l_{p1b} 及び駆動変位量 l_{p1c} を第 2 の切替部 1 2 5 を介して連続体ロボット 1 3 0 に出力しないように制御する。同時に、切替判定部 1 2 2 は、第 1 の切替部 1 2 3 を図 1 に示すものと逆方向に切り替えて、ステップ S 1 0 2 で算出された駆動変位量 l_{p1b} 及び駆動変位量 l_{p1c} を記憶部 1

10

20

30

40

50

24に記憶しないように制御するとともに、予め記憶部124に記憶されている、上述した接触のおそれが無い駆動変位量 l_{p1b} 及び駆動変位量 l_{p1c} を、第2の切替部125を介して連続体ロボット130に出力する制御を行う。

【0072】

ステップS105の処理が終了した場合、或いは、ステップS106の処理が終了した場合には、ステップS107に進む。

ステップS107に進むと、制御装置120は、ステップS105或いはステップS106において第2の切替部125から出力した（上述した接触のおそれが無い）駆動変位量 l_{p1b} 及び駆動変位量 l_{p1c} のそれぞれに基づきワイヤ1302及び1303の駆動を制御し、連続体ロボット130の駆動制御を行う。

10

【0073】

ステップS107の処理が終了すると、ステップS101に戻り、入力装置110から次の目標湾曲角度 θ_{ref1} 及び目標旋回角度 ζ_{ref1} が入力されるまで待機する。

【0074】

<湾曲角度 θ_1 の最大値>

次いで、運動学演算部121による運動学を用いて、湾曲角度 θ_1 の最大値を算出する場合について説明する。

湾曲角度 θ_1 の最大値を算出する場合、湾曲角度 θ_1 の範囲は、第1のワイヤガイド1321の遠位端13214における基台部1310の上面1314との接触と、第2のワイヤガイド1325の近位端13252における基台部1310の上面1314との接触により定まる。ここでは、前者による湾曲角度 θ_1 の制約を270度に設定し、本実施形態では、後者が原因となる湾曲角度 θ_1 の最大値を算出する。この場合、例えば、旋回角度 ζ_1 を0度から1度刻みで359度まで変化させ、各旋回角度 ζ_1 において湾曲角度 θ_1 を0度から1度刻みで270度まで変化させる。

20

【0075】

上述した(20)式により座標値 $z_{e1}(\theta_e)$ を算出し、それが閾値（ここでは0とする）以上となる範囲の最大湾曲角度を θ_{1max} として、シミュレーションした結果を図6に示す。すなわち、図6は、本発明の第1の実施形態を示し、各旋回角度 ζ_1 と最大湾曲角度 θ_{1max} との関係をシミュレーションした結果を示す図である。この図6により、旋回角度 ζ_1 が180度において、最大湾曲角度 θ_{1max} が最小となることがわかる。これは、旋回方向が原点Oからみたワイヤ1301の方向と逆方向になる旋回角度 ζ_1 において、近位端13252と基台部1310の上面1314とが接触する湾曲角度が最も小さくなることを示している。

30

【0076】

以上説明したように、第1の実施形態では、切替判定部122は、運動学演算部121で算出された座標値 $z_{e1}(\theta_e)$ に応じて、当該座標値とともに運動学演算部121で算出されたワイヤ1302及び1303の駆動変位量のそれぞれに基づくワイヤ1302及び1303の駆動を行うか否かを制御（駆動制御）するようにしている。

かかる構成によれば、例えば挿抜経路400に沿って連続体ロボット130の湾曲部1320を駆動させる際に（より詳細に、例えば湾曲部1320を挿抜経路400に接触しないように駆動させる際に）、当該湾曲部の湾曲形状の基準面となる部材（基台部1310）と当該湾曲部内の最も基準面に近い部材（第2のワイヤガイド1325）との接触を防止することができる。

40

【0077】

（第2の実施形態）

次に、本発明の第2の実施形態について説明する。なお、以下の第2の実施形態における説明では、第1の実施形態と共通する部分については必要に応じてその説明を省略し、第1の実施形態と異なる部分を中心に説明を行う。

【0078】

<連続体ロボットの制御システムの構成例>

50

図 7 は、本発明の第 2 の実施形態に係る連続体ロボットの制御システム 200 の構成例を示す模式図である。連続体ロボットの制御システム 200 は、図 7 に示すように、入力装置 210 と、制御装置 220 と、連続体ロボット 230 とを有して構成されている。

【0079】

連続体ロボットの構成例

まず、図 7 に示す連続体ロボット 230 の構成例について説明する。

図 8 は、図 7 に示す連続体ロボット 230 の構成例を示す模式図である。この図 8 において、図 2 に示す構成と同様の機能を有する構成については同じ符号を付しており、その詳細な説明は省略する。また、図 8 においては、図 2 に示す基台部 1310 の上面 1314 のみを図示し、当該上面 1314 よりも下方に位置する基台部 1310 の内部構成は省略している。連続体ロボット 230 は、図 8 に示すように、基台部 1310（図 8 では、基台部 1310 の上面 1314 のみ図示）と、第 1 湾曲部 1320 と、第 2 湾曲部 1330 と、第 3 湾曲部 1340 を有して構成されている。ここで、図 8 においては、図 2 に示す湾曲部 1320 に相当する構成を「第 1 湾曲部 1320」としている。

【0080】

図 8 に示す連続体ロボット 230 は、長軸方向に直列に複数の湾曲部 1320 ~ 1340 を有し、複数の湾曲部 1320 ~ 1340 の長軸方向に移動可能に構成されている。なお、図 8 に示す例では、3 つの湾曲部を備える連続体ロボットを示しているが、本実施形態においてはこの態様に限定されるものではない。例えば 2 つの湾曲部を備える連続体ロボットや 4 つ以上の湾曲部を備える連続体ロボットも、本実施形態に適用可能である。

【0081】

第 1 湾曲部 1320 は、当該第 1 湾曲部 1320 の基準面に相当する基台部 1310 の上面 1314 を介して延伸する複数のワイヤ 1301 - 1 ~ 1303 - 1 と、複数のワイヤ 1301 - 1 ~ 1303 - 1 が異なる位置に固定され、複数のワイヤ 1301 - 1 ~ 1303 - 1 を案内する第 1 のワイヤガイド 1321 と、基台部 1310 の上面 1314 と第 1 のワイヤガイド 1321 との間に複数のワイヤ 1301 - 1 ~ 1303 - 1 のうちの一部のワイヤ 1301 - 1 が所定の位置に固定されて設けられ、複数のワイヤ 1301 - 1 ~ 1303 - 1 を案内する第 2 のワイヤガイド 1322 ~ 1325 と、を含み形成されている。この第 1 湾曲部 1320 においては、当該第 1 湾曲部 1320 の基準面に相当する基台部 1310 の上面 1314 を基準として、図 2 に示す x 軸に相当する「 x_1 軸」、図 2 に示す y 軸に相当する「 y_1 軸」、図 2 に示す z 軸に相当する「 z_1 軸」、図 2 に示す w 軸に相当する「 w_1 軸」が定義される。また、この第 1 湾曲部 1320 において、第 1 のワイヤガイド 1321 の遠位端 13214、及び、第 2 のワイヤガイド 1325 の近位端 13252 を示している。この場合、第 1 湾曲部 1320 は、基台部 1310 の上面 1314（厳密に言えば、上面 1314 自体は含まない）から第 1 のワイヤガイド 1321 の遠位端 13214 に至るまでとなっている。その他、第 1 湾曲部 1320 に関する構成等については、上述した第 1 の実施形態における湾曲部 1320 と同様である。

【0082】

第 2 湾曲部 1330 は、当該第 2 湾曲部 1330 の基準面に相当する第 1 湾曲部 1320 の第 1 のワイヤガイド 1321 の遠位端 13214 の面を介して延伸する複数のワイヤ 1301 - 2 ~ 1303 - 2 と、複数のワイヤ 1301 - 2 ~ 1303 - 2 が異なる位置に固定され、複数のワイヤ 1301 - 2 ~ 1303 - 2 を案内する第 1 のワイヤガイド 1331 と、第 1 湾曲部 1320 の第 1 のワイヤガイド 1321 の遠位端 13214 の面と第 1 のワイヤガイド 1331 との間に複数のワイヤ 1301 - 2 ~ 1303 - 2 のうちの一部のワイヤ 1301 - 2 が所定の位置に固定されて設けられ、複数のワイヤ 1301 - 2 ~ 1303 - 2 を案内する第 2 のワイヤガイド 1332 ~ 1335 と、を含み形成されている。この第 2 湾曲部 1330 においては、当該第 2 湾曲部 1330 の基準面に相当する第 1 湾曲部 1320 の第 1 のワイヤガイド 1321 の遠位端 13214 の面を基準として、図 2 に示す x 軸に相当する「 x_2 軸」、図 2 に示す y 軸に相当する「 y_2 軸」、図 2 に示す z 軸に相当する「 z_2 軸」、図 2 に示す w 軸に相当する「 w_2 軸」が定義される。また

、この第2湾曲部1330において、第1のワイヤガイド1331の遠位端13314、及び、第2のワイヤガイド1335の近位端13351を示している。この場合、第2湾曲部1330は、第1湾曲部1320の第1のワイヤガイド1321の遠位端13214の面（厳密に言えば、遠位端13214の面自体は含まない）から第1のワイヤガイド1331の遠位端13311に至るまでとなっている。また、本実施形態においては、基台部1310の内部には、第1の実施形態における構成に加えて、ワイヤ1302-2を押し引き駆動させるためのアクチュエータ（図2のアクチュエータ1311に相当するアクチュエータ）と、ワイヤ1303-2を押し引き駆動させるためのアクチュエータ（図2のアクチュエータ1312に相当するアクチュエータ）と、ワイヤ1301-2の一端を固定する固定部（図2の固定部1313に相当する固定部）も設けられている。すなわち、図8に示す連続体ロボット230では、これらのアクチュエータを制御してワイヤ1302-2及び1303-2を駆動することにより、第2湾曲部1330を所望の湾曲形状（例えば、円弧状）に湾曲可能に構成されている。

【0083】

第3湾曲部1340は、当該第3湾曲部1340の基準面に相当する第2湾曲部1330の第1のワイヤガイド1331の遠位端13311の面を介して延伸する複数のワイヤ1301-3～1303-3と、複数のワイヤ1301-3～1303-3が異なる位置に固定され、複数のワイヤ1301-3～1303-3を案内する第1のワイヤガイド1341と、第2湾曲部1320の第1のワイヤガイド1321の遠位端13311の面と第1のワイヤガイド1341との間に複数のワイヤ1301-3～1303-3のうちの一部のワイヤ1301-3が所定の位置に固定されて設けられ、複数のワイヤ1301-3～1303-3を案内する第2のワイヤガイド1342～1345と、を含み形成されている。この第3湾曲部1340においては、当該第3湾曲部1330の基準面に相当する第2湾曲部1330の第1のワイヤガイド1331の遠位端13311の面を基準として、図2に示すx軸に相当する「 x_3 軸」、図2に示すy軸に相当する「 y_3 軸」、図2に示すz軸に相当する「 z_3 軸」、図2に示すw軸に相当する「 w_3 軸」が定義される。また、この第2湾曲部1340において、第1のワイヤガイド1341の遠位端13411、及び、第2のワイヤガイド1345の近位端13451を示している。この場合、第3湾曲部1340は、第2湾曲部1330の第1のワイヤガイド1331の遠位端13311の面（厳密に言えば、遠位端13311の面自体は含まない）から第1のワイヤガイド1341の遠位端13411に至るまでとなっている。また、本実施形態においては、基台部1310の内部には、更に、ワイヤ1302-3を押し引き駆動させるためのアクチュエータ（図2のアクチュエータ1311に相当するアクチュエータ）と、ワイヤ1303-3を押し引き駆動させるためのアクチュエータ（図2のアクチュエータ1312に相当するアクチュエータ）と、ワイヤ1301-3の一端を固定する固定部（図2の固定部1313に相当する固定部）も設けられている。すなわち、図8に示す連続体ロボット230では、これらのアクチュエータを制御してワイヤ1302-3及び1303-3を駆動することにより、第3湾曲部1340を所望の湾曲形状（例えば、円弧状）に湾曲可能に構成されている。

【0084】

また、図8に示す連続体ロボット230は、第1のワイヤガイド1341よりも上面1314から遠い方にカメラ（不図示）が設けられている。これにより、湾曲部1320～1340を挿抜経路400に沿って挿入することにより、挿抜経路400の内部を観察可能となっている。

【0085】

なお、本実施形態においては、各湾曲部1320～1340によって基準面が異なることから、図8では、各湾曲部の湾曲角度 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 と、各湾曲部の旋回角度 ζ_1 、 ζ_2 、 ζ_3 に、後述する相対座標系であることを示す符号（ $\sim$ ）を上付している。

【0086】

ここで、再び、図7の説明に戻る。なお、図7に示す例では、連続体ロボット230に

10

20

30

40

50

e 個の湾曲部が設けられている場合を示している。この際、図 8 に示す連続体ロボット 230 の制御を行う場合には、 $e = 3$ となる。

【0087】

入力装置 210 は、e 個の湾曲部における各湾曲部の湾曲形状パラメータである、当該各湾曲部の湾曲角度 θ の目標値である目標湾曲角度 θ_{ref} 、及び、当該各湾曲部の旋回角度 ζ の目標値である目標旋回角度 ζ_{ref} を、制御装置 120 に対して入力する。ここで、入力される目標湾曲角度 θ_{ref} 及び目標旋回角度 ζ_{ref} は、後述する相対座標系のものであるため、相対座標系であることを示す符号 (~) を上に付している。また、入力装置 210 は、目標湾曲角度 θ_{ref} 及び目標旋回角度 ζ_{ref} からなる湾曲形状パラメータを時系列で (例えば、所定の離散時間ステップごとに) 順次入力することが可能に構成されている。この際、入力装置 210 は、異なる値の目標湾曲角度 θ_{ref} 及び目標旋回角度 ζ_{ref} からなる湾曲形状パラメータを時系列で順次入力することも可能である。

10

【0088】

制御装置 220 は、入力装置 210 から入力された各湾曲部の湾曲形状パラメータに応じて、連続体ロボット 230 の駆動制御を行う。この制御装置 220 は、図 7 に示すように、運動学演算部 221 と、切替判定部 222 と、第 1 の切替部 223 と、記憶部 224 と、第 2 の切替部 225 - 1 ~ 225 - e を有して構成されている。具体的に、制御装置 220 は、各湾曲部ごとに、3 本のワイヤ 1301 ~ 1303 のうちの 2 本のワイヤ 1302 及び 1303 を駆動することにより立体的に形状の制御が可能な連続体ロボット 230 の運動学を導出する。そして、制御装置 220 は、各湾曲部ごとに、当該湾曲部の基準面と、当該基準面に最も近い第 2 のワイヤガイドの近位端との接触を回避するための制御を行う。

20

【0089】

運動学演算部 221 は、入力装置 210 からの各湾曲部の目標湾曲角度 θ_{ref} 及び目標旋回角度 ζ_{ref} の入力に応じて、ワイヤ 1302 の駆動変位量 l_{p1b} , l_{p2b} , ..., l_{peb} 、及び、ワイヤ 1303 の駆動変位量 l_{p1c} , l_{p2c} , ..., l_{pec} を算出する。さらに、運動学演算部 221 は、入力装置 210 からの各湾曲部の目標湾曲角度 θ_{ref} 及び目標旋回角度 ζ_{ref} の入力に応じて、基準面と当該基準面に最も近い第 2 のワイヤガイドの近位端との距離を表す距離情報である座標値 $z_{e1}(\theta_e)$, ..., $z_{ee}(\theta_e)$ を算出する。ここで算出される座標値 $z_{e1}(\theta_e)$, ..., $z_{ee}(\theta_e)$ は、後述する相対座標系のものであるため、相対座標系であることを示す符号 (~) を上に付している。この駆動変位量 l_{p1b} , l_{p2b} , ..., l_{peb} 、駆動変位量 l_{p1c} , l_{p2c} , ..., l_{pec} 、及び、座標値 $z_{e1}(\theta_e)$, ..., $z_{ee}(\theta_e)$ を算出する運動学演算部 221 は、本発明の「算出手段」に相当する構成の一例である。

30

【0090】

切替判定部 222 は、運動学演算部 221 で算出された座標値 $z_{e1}(\theta_e)$, ..., $z_{ee}(\theta_e)$ に応じて、各湾曲部ごとに、当該座標値とともに運動学演算部 221 で算出された駆動変位量 l_{p1b} , l_{p2b} , ..., l_{peb} 及び駆動変位量 l_{p1c} , l_{p2c} , ..., l_{pec} のそれぞれに基づくワイヤ 1302 及び 1303 の駆動を行うか否かを制御 (駆動制御) する。具体的に、切替判定部 222 は、各湾曲部ごとに、座標値 $z_{e1}(\theta_e)$, ..., $z_{ee}(\theta_e)$ が閾値以下であるか否かを判断し、当該判断の結果に基づいて、上述した駆動制御を行う。ここで、閾値として、例えば 0 を設定すれば、上述した座標値が閾値である 0 以下の場合には、各湾曲部において、当該湾曲部の基準面と当該基準面に最も近い第 2 のワイヤガイドの近位端とが接触することが想定される。この基準面と当該基準面に最も近い第 2 のワイヤガイドの近位端との接触の観点からは、閾値として 0 を設定することが好適である。しかしながら、本発明においてはこの態様に限定されるものではなく、接触に係る安全率を考慮して、閾値として所定の正の値を設定する態様も、本発明に適用可能である。

40

【0091】

各湾曲部ごとに算出された座標値 $z_{e1}(\theta_e)$, ..., $z_{ee}(\theta_e)$ のそれぞれについて当該座標値が閾値以下でない場合、切替判定部 222 は、当該湾曲部の基準面と当該基準面

50

に最も近い第 2 のワイヤガイドの近位端とが接触するおそれが無いと判定する。この場合、切替判定部 222 は、各湾曲部ごとに、対応する第 1 の切替部 223 及び第 2 の切替部 225 (225-1 ~ 225-e) を図 7 に示すように切り替える。具体的に、切替判定部 222 は、各湾曲部ごとに、対応する第 2 の切替部 225 を図 7 に示すように切り替えて、当該座標値とともに運動学演算部 221 で算出されたワイヤ 1302 及び 1303 の駆動変位量を連続体ロボット 230 に出力する制御を行う。これにより、連続体ロボット 230 では、当該座標値とともに運動学演算部 221 で算出されたワイヤ 1302 及び 1303 の駆動変位量のそれぞれに基づくワイヤ 1302 及び 1303 の駆動が行われることになる。また、この場合、切替判定部 222 は、各湾曲部ごとに、対応する第 1 の切替部 223 を図 7 に示すように切り替えて、当該座標値とともに運動学演算部 221 で算出されたワイヤ 1302 及び 1303 の駆動変位量を記憶部 224 に記憶する制御を行う。このように、記憶部 224 には、上述した座標値が閾値以下でなかった場合 (すなわち、接触するおそれが無いと判定された場合) に当該座標値とともに運動学演算部 221 で算出されたワイヤ 1302 及び 1303 の駆動変位量が記憶される。

10

20

30

40

【0092】

一方、各湾曲部ごとに算出された座標値 $z_{e1}(\theta_e), \dots, z_{ee}(\theta_e)$ のそれぞれについて当該座標値が閾値以下である場合、切替判定部 222 は、当該湾曲部の基準面と当該基準面に最も近い第 2 のワイヤガイドの近位端とが接触するおそれが有ると判定する。この場合、切替判定部 222 は、各湾曲部ごとに、対応する第 1 の切替部 223 及び第 2 の切替部 225 (225-1 ~ 225-e) を図 7 に示すものと逆方向に切り替える。すなわち、この場合、切替判定部 222 は、当該座標値とともに運動学演算部 221 で算出されたワイヤ 1302 及び 1303 の駆動変位量のそれぞれに基づくワイヤ 1302 及び 1303 の駆動を行わないように制御する。具体的に、まず、切替判定部 222 は、各湾曲部ごとに、対応する第 1 の切替部 223 を図 7 に示すものと逆方向に切り替えて、当該座標値とともに運動学演算部 221 で算出されたワイヤ 1302 及び 1303 の駆動変位量を記憶部 224 に記憶しない制御を行う。これにより、記憶部 224 には、各湾曲部ごとに、上述した座標値が閾値以下でなかった場合 (すなわち、接触するおそれが無いと判定された場合) に当該座標値とともに運動学演算部 221 で算出されたワイヤ 1302 及び 1303 の駆動変位量のみが記憶される。また、切替判定部 222 は、各湾曲部ごとに、対応する第 2 の切替部 225 を図 7 に示すものと逆方向に切り替えて、当該座標値とともに運動学演算部 221 で算出されたワイヤ 1302 及び 1303 の駆動変位量を連続体ロボット 230 に出力しない制御を行う。これにより、連続体ロボット 230 では、当該座標値とともに運動学演算部 221 で算出されたワイヤ 1302 及び 1303 の駆動変位量のそれぞれに基づくワイヤ 1302 及び 1303 の駆動が行われず、上述した接触を回避することができる。より詳細に、この場合、切替判定部 222 は、各湾曲部ごとに、対応する第 2 の切替部 225 を図 7 に示すものと逆方向に切り替えて、予め記憶部 224 に記憶されている、以前に運動学演算部 221 で当該湾曲部について算出され上述した座標値が閾値以下でなかった場合 (すなわち、接触するおそれが無いと判定された場合) に当該座標値とともに算出されたワイヤ 1302 及び 1303 の駆動変位量を連続体ロボット 230 に出力する制御を行う。これにより、連続体ロボット 230 では、各湾曲部ごとに、上述した接触を回避しつつ、当該各湾曲部の駆動が行われることになる。

【0093】

なお、本実施形態においては、記憶部 224 に、各湾曲部ごとに、運動学演算部 221 で算出された所定の駆動変位量を記憶するようにしているが、本発明においてはこの形態に限定されるものではない。例えば、運動学演算部 221 で算出されたものではなく、各湾曲部ごとに、上述した接触を回避できることが検証されたワイヤ 1302 及び 1303 の駆動変位量を予め記憶しておく形態も、本発明に適用可能である。また、切替判定部 222 は、本発明の「判定手段」に相当する構成の一例である。

【0094】

図 7 に示す制御装置 220 の運動学演算部 221、切替判定部 222、第 1 の切替部 2

50

23、記憶部224及び第2の切替部225-1~225-eは、ハードウェアで構成されていても、ソフトウェアで構成されていてもよい。ここで、図7に示す制御装置220の各構成部221~225がソフトウェアで構成されている場合には、例えばコンピュータのCPUがROM等の記憶媒体に記憶されているプログラムを実行することにより、各構成部221~225の機能が実現される。

【0095】

次いで、制御装置220の具体的な処理例について説明する。

なお、以下の説明では、図8に示す連続体ロボット230にn個の湾曲部が設けられている場合について説明する。

【0096】

この場合、第n湾曲部の相対座標系としては、第n-1湾曲部における第1のワイヤガイドの遠位端の面が基準面となる。第n-1湾曲部における第1のワイヤガイドの遠位端の面の中心軸1304の延長線上に z_n 軸を取り、 $z_{n-1}w_{n-1}$ 平面上の z_n 軸と直交する方向に x_n 軸をとる。そして、 z_n 軸及び x_n 軸と直交する右手系の座標軸として y_n 軸をとる。

【0097】

本実施形態では、まず、第n湾曲部の湾曲角度とその第1のワイヤガイドの遠位端の座標との関係を導出する。ただし、nは2以上とする。第1の実施形態で説明したように、第n湾曲部の中心軸の長さ(l_{nd})はその湾曲形状により変動する。複数の湾曲部を考えると、形状の変化に対して不変なワイヤ長は、各湾曲部の固定ワイヤであるワイヤ1301の、当該湾曲部の第1のワイヤガイドの遠位端から基台部1310までの全長である。そこで、第n湾曲部におけるワイヤ1301の長さを求めるために、当該第n湾曲部よりも基台部1310に近い全ての湾曲部において、第n湾曲部のワイヤ1301が通過している長さを求める必要がある。

【0098】

ここで、第m湾曲部の第1のワイヤガイドの遠位端に接続されているワイヤ1301の第n湾曲部における長さを l_{man} とする。また、全ての湾曲角度及び旋回角度を0とする直立姿勢を取るときの、各湾曲部の中心軸の長さを l とする。これより、第n湾曲部の固定ワイヤであるワイヤ1301の全長は nl となる。

【0099】

まず、第1湾曲部における第m湾曲部のワイヤの長さを求める。図3に示す位相角 ξ_n を位相角 ξ_m と置き換えて、第m湾曲部のワイヤが配置されているとき、第m湾曲部の第1湾曲部に対する相対的な位相角を以下のようにして、(24)式と定義する。

【0100】

【数15】

第m湾曲部の第1湾曲部に対する相対的な位相角を $\hat{\zeta}_{1m}$ とする。

$$\hat{\zeta}_{1m} = \xi_m - \tilde{\zeta}_1 \quad \dots \quad (24)$$

【0101】

これにより、第m湾曲部の第1のワイヤガイドの遠位端に接続されているワイヤ1301の第1湾曲部における長さ l_{ma1} 、この場合のワイヤ1302の長さ l_{mb1} 及びワイヤ1303の長さ l_{mc1} は、それぞれ、以下の(25)式~(27)式となる。

【0102】

10

20

30

40

【数 1 6】

$$l_{ma1} = l_{1a} + \frac{r_s}{\sqrt{3}} (\cos \tilde{\zeta}_1 - \cos \hat{\zeta}_{1m}) \tilde{\theta}_1 \quad \dots \quad (25)$$

$$l_{mb1} = l_{1a} + \frac{r_s}{\sqrt{3}} \left\{ \cos \tilde{\zeta}_1 - \cos \left(\frac{2\pi}{3} + \hat{\zeta}_{1m} \right) \right\} \tilde{\theta}_1 \quad \dots \quad (26)$$

$$l_{mc1} = l_{1a} + \frac{r_s}{\sqrt{3}} \left\{ \cos \tilde{\zeta}_1 - \cos \left(\frac{4\pi}{3} + \hat{\zeta}_{1m} \right) \right\} \tilde{\theta}_1 \quad \dots \quad (27)$$

【0 1 0 3】

10

続いて、第 2 湾曲部を考えると、区間内のワイヤ 1 3 0 1 の長さ l_{2a} は、第 2 湾曲部のワイヤ 1 3 0 1 の全長 (2 1) から第 1 湾曲部の内部を通過する第 2 湾曲部のワイヤ 1 3 0 1 の長さ (l_{2a1}) を差し引けばよいから、以下の (2 8) 式により求まる。

【0 1 0 4】

【数 1 7】

$$l_{2a} = 2l - l_{2a1} \quad \dots \quad (28)$$

【0 1 0 5】

ここで、第 2 湾曲部まで中心軸回りの旋回角度の総和から位相角 ξ_2 を差し引いた角度 ν_2 を、以下の (2 9) 式により定義する。

20

【0 1 0 6】

【数 1 8】

$$\nu_2 = \sum_{k=1}^2 \tilde{\zeta}_k - \xi_2 \quad \dots \quad (29)$$

【0 1 0 7】

そうすると、第 2 湾曲部における中心軸の長さ l_{2d} と、その場合のワイヤ 1 3 0 2 の長さ l_{2b} 及びワイヤ 1 3 0 3 の長さ l_{2c} は、それぞれ、以下の (3 0) 式 ~ (3 2) 式となる。

30

【0 1 0 8】

【数 1 9】

$$l_{2d} = l_{2a} + \frac{r_s}{\sqrt{3}} \cos \nu_2 \tilde{\theta}_2 \quad \dots \quad (30)$$

$$l_{2b} = l_{2a} + r_s \cos \left(\frac{\pi}{6} + \nu_2 \right) \tilde{\theta}_2 \quad \dots \quad (31)$$

$$l_{2c} = l_{2a} + r_s \cos \left(\frac{\pi}{6} - \nu_2 \right) \tilde{\theta}_2 \quad \dots \quad (32)$$

40

【0 1 0 9】

このように、第 2 湾曲部における中心軸の長さ l_{2d} は、(2 8) 式に示すワイヤ 1 3 0 1 の長さ l_{2a1} を用いて求めることができる。さらに、第 2 湾曲部以降の湾曲部の中心軸の長さを求めるために、第 2 湾曲部を通過する第 m 湾曲部のワイヤの長さを求める。第 m 湾曲部の第 2 湾曲部に対する相対的な位相角を以下のようにして、以下の (3 3) 式と定義する。

【0 1 1 0】

【数 2 0】

第 m 湾曲部の第2湾曲部に対する相対的な位相角を $\hat{\zeta}_{2m}$ とする。

$$\hat{\zeta}_{2m} = \xi_m - \sum_{k=1}^2 \tilde{\zeta}_k \quad \dots \quad (33)$$

【0 1 1 1】

これにより、第 m 湾曲部の第1のワイヤガイドの遠位端に接続されているワイヤ1301の第2湾曲部における長さ l_{ma2} 、この場合のワイヤ1302の長さ l_{mb2} 及びワイヤ1303の長さ l_{mc2} は、それぞれ、以下の(34)式～(36)式となる。

【0 1 1 2】

【数 2 1】

$$l_{ma2} = l_{2a} + \frac{r_s}{\sqrt{3}} (\cos \nu_2 - \cos \hat{\zeta}_{2m}) \tilde{\theta}_2 \quad \dots \quad (34)$$

$$l_{mb2} = l_{2a} + \frac{r_s}{\sqrt{3}} \left\{ \cos \nu_2 - \cos \left(\frac{2\pi}{3} + \hat{\zeta}_{2m} \right) \right\} \tilde{\theta}_2 \quad \dots \quad (35)$$

$$l_{mc2} = l_{2a} + \frac{r_s}{\sqrt{3}} \left\{ \cos \nu_2 - \cos \left(\frac{4\pi}{3} + \hat{\zeta}_{2m} \right) \right\} \tilde{\theta}_2 \quad \dots \quad (36) \quad 20$$

【0 1 1 3】

このように、各湾曲部の中心軸の長さは、基台部1310に近い湾曲部から順に求めることができる。一般化し、第 n 湾曲部を考えると、区間内のワイヤ1301の長さ l_{na} は、以下の(37)式で求まる。

【0 1 1 4】

【数 2 2】

$$l_{na} = nl - (l_{na1} + l_{na2} + \dots + l_{na(n-1)}) = nl - \sum_{k=1}^{n-1} l_{nak} \quad \dots \quad (37) \quad 30$$

【0 1 1 5】

ここで、(29)式に示す角度を一般化した角度 ν_n を、以下の(38)式により定義する。

【0 1 1 6】

【数 2 3】

$$\nu_n = \sum_{k=1}^n \tilde{\zeta}_k - \xi_n \quad \dots \quad (38) \quad 40$$

【0 1 1 7】

そうすると、第 n 湾曲部における中心軸の長さ l_{nd} と、その場合のワイヤ1302の長さ l_{nb} 及びワイヤ1303の長さ l_{nc} は、それぞれ、以下の(39)式～(41)式となる。

【0 1 1 8】

【数 2 4】

$$l_{nd} = l_{na} + \frac{r_s}{\sqrt{3}} \cos \nu_n \tilde{\theta}_n \quad \dots \quad (39)$$

$$l_{nb} = l_{na} + r_s \cos\left(\frac{\pi}{6} + \nu_n\right) \tilde{\theta}_n \quad \dots \quad (40)$$

$$l_{nc} = l_{na} + r_s \cos\left(\frac{\pi}{6} - \nu_n\right) \tilde{\theta}_n \quad \dots \quad (41)$$

【0 1 1 9】

10

さらに、(33) 式を一般化して、以下の(42) 式と定義する。

【0 1 2 0】

【数 2 5】

$$\hat{\zeta}_{nm} = \xi_m - \sum_{k=1}^n \tilde{\zeta}_k \quad \dots \quad (42)$$

【0 1 2 1】

これにより、第 n 湾曲部を通過する第 m 湾曲部のワイヤ 1 3 0 1 の長さ l_{man} 、この場合のワイヤ 1 3 0 2 の長さ l_{mbn} 及びワイヤ 1 3 0 3 の長さ l_{mcn} は、それぞれ、以下の(43) 式 ~ (45) 式となる。

20

【0 1 2 2】

【数 2 6】

$$l_{man} = l_{na} + \frac{r_s}{\sqrt{3}} (\cos \nu_n - \cos \hat{\zeta}_{nm}) \tilde{\theta}_n \quad \dots \quad (43)$$

$$l_{mbn} = l_{na} + \frac{r_s}{\sqrt{3}} \left\{ \cos \nu_n - \cos\left(\frac{2\pi}{3} + \hat{\zeta}_{nm}\right) \right\} \tilde{\theta}_n \quad \dots \quad (44)$$

$$l_{mcn} = l_{na} + \frac{r_s}{\sqrt{3}} \left\{ \cos \nu_n - \cos\left(\frac{4\pi}{3} + \hat{\zeta}_{nm}\right) \right\} \tilde{\theta}_n \quad \dots \quad (45)$$

30

【0 1 2 3】

以上の手順で求められる第 n 湾曲部の中心軸の長さ l_{nd} を用いると、相対座標系 (x_n, y_n, z_n) における第 n 湾曲部の第 1 のワイヤガイドの遠位端の座標は、以下の(46) 式 ~ (48) 式となる。

【0 1 2 4】

【数 2 7】

相対座標系 (x_n, y_n, z_n) における第 n 湾曲部の遠位端の座標を $(\tilde{x}_{tn}, \tilde{y}_{tn}, \tilde{z}_{tn})$ とする。

40

$$\tilde{x}_{tn} = \frac{l_{nd}}{\tilde{\theta}_n} (1 - \cos \tilde{\theta}_n) \cos(\tilde{\zeta}_n + \xi_n) \quad \dots \quad (46)$$

$$\tilde{y}_{tn} = \frac{l_{nd}}{\tilde{\theta}_n} (1 - \cos \tilde{\theta}_n) \sin(\tilde{\zeta}_n + \xi_n) \quad \dots \quad (47)$$

$$\tilde{z}_{tn} = \frac{l_{nd}}{\tilde{\theta}_n} \sin \tilde{\theta}_n \quad \dots \quad (48)$$

【0 1 2 5】

50

これより、絶対座標系における第 n 湾曲部の第 1 のワイヤガイドの遠位端の座標 (x_{tn} , y_{tn} , z_{tn}) は、回転変換行列を用いて、以下の (49) 式となる。

【0126】

【数28】

$$\begin{bmatrix} x_{tn} \\ y_{tn} \\ z_{tn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{t1} \\ y_{t1} \\ z_{t1} \end{bmatrix} + \sum_{m=2}^n \prod_{k=1}^{m-1} R_z(\tilde{\zeta}_k + \xi_k) R_y(\tilde{\theta}_k) \begin{bmatrix} \tilde{x}_{tm} \\ \tilde{y}_{tm} \\ \tilde{z}_{tm} \end{bmatrix} \cdots \quad (49)$$

【0127】

10

第 n 湾曲部の第 1 のワイヤガイドの遠位端から長さ l_{awn} にある第 2 のワイヤガイドの近位端の外周の座標については、以下に示す相対座標系における座標を求める。また、当該第 2 のワイヤガイドの中心座標を以下に示す座標として記載する。

【0128】

【数29】

相対座標系における座標 ($\tilde{x}_{en}, \tilde{y}_{en}, \tilde{z}_{en}$) を求める。

ワイヤガイドの中心座標を ($\tilde{x}_{en0}, \tilde{y}_{en0}, \tilde{z}_{en0}$) とする。

20

【0129】

そして、以下の (50) 式を定義する。

【0130】

【数30】

$$l_{wn} = l_{na} - l_{awn}, \quad \tilde{\theta}_{wn} = \frac{l_{wn}}{l_{na}} \tilde{\theta}_n \cdots \quad (50)$$

【0131】

この場合、上述した第 2 のワイヤガイドの中心座標は、以下の (51) 式 ~ (53) 式となる。

30

【0132】

【数31】

$$\tilde{x}_{en0} = \left\{ \frac{l_{wn}}{\tilde{\theta}_{wn}} (1 - \cos \tilde{\theta}_{wn}) - \frac{r_s}{\sqrt{3}} \cos \tilde{\zeta}_n \cos \tilde{\theta}_{wn} \right\} \cos \tilde{\zeta}_n \cdots \quad (51)$$

$$\tilde{y}_{en0} = \left\{ \left(\frac{l_{wn}}{\tilde{\theta}_{wn}} + \frac{r_s}{\sqrt{3}} \cos \tilde{\zeta}_n \right) \sin \tilde{\theta}_{wn} \right\} \sin \tilde{\zeta}_n \cdots \quad (52)$$

$$\tilde{z}_{en0} = \left(\frac{l_{wn}}{\tilde{\theta}_{wn}} + \frac{r_s}{\sqrt{3}} \cos \tilde{\zeta}_n \right) \sin \tilde{\theta}_{wn} \cdots \quad (53)$$

40

【0133】

このことから、上述した第 n 湾曲部の第 1 のワイヤガイドの遠位端から長さ l_{awn} にある第 2 のワイヤガイドの近位端の外周の相対座標系における座標は、以下の (54) 式となる。

【0134】

【数 3 2】

$$\begin{bmatrix} \tilde{x}_{en}(\theta_e) \\ \tilde{y}_{en}(\theta_e) \\ \tilde{z}_{en}(\theta_e) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{en0} \\ \tilde{y}_{en0} \\ \tilde{z}_{en0} \end{bmatrix} + R_z(\tilde{\zeta}_n)R_y(\tilde{\theta}_n) \begin{bmatrix} r_{wg} \cos \theta_e \\ r_{wg} \sin \theta_e \\ 0 \end{bmatrix} \quad \dots \quad (54)$$

【0 1 3 5】

次いで、第 n 湾曲部におけるワイヤ 1 3 0 2 の駆動変位量 l_{pnb} 及びワイヤ 1 3 0 3 の駆動変位量 l_{pnc} と、第 n 湾曲部の湾曲角度 θ_n 及び旋回角度 ζ_n との関係を導出する。ただし、 n は 2 以上とする。相対座標系 (x_n, y_n, z_n) における各ワイヤの駆動変位量と第 1 湾曲部の湾曲角度との関係は、以下の (55) 式 ~ (56) 式のようになる。

10

【0 1 3 6】

【数 3 3】

相対座標系 (x_n, y_n, z_n) におけるワイヤの駆動変位量 $\tilde{l}_{pn}$ と、第 1 湾曲部の遠位端の角度 $\tilde{\theta}_n$ との関係は、以下のようになる。

$$\tilde{l}_{pnb} = r_s \cos\left(\frac{\pi}{6} + \tilde{\zeta}_n - \xi_n\right)\tilde{\theta}_n \quad \dots \quad (55)$$

$$\tilde{l}_{pnc} = r_s \cos\left(\frac{\pi}{6} - \tilde{\zeta}_n + \xi_n\right)\tilde{\theta}_n \quad \dots \quad (56)$$

20

【0 1 3 7】

第 n 湾曲部におけるワイヤ 1 3 0 2 及び 1 3 0 3 の駆動変位量 l_{pnb} 、 l_{pnc} は、第 1 湾曲部から第 n 湾曲部までの相対座標系におけるワイヤの駆動変位量の総和となり、以下の (57) 式となる。

【0 1 3 8】

【数 3 4】

$$l_{pnb} = \sum_{m=1}^n \tilde{l}_{pmb}, \quad l_{pnc} = \sum_{m=1}^n \tilde{l}_{pmc} \quad \dots \quad (57)$$

30

【0 1 3 9】

ここでは、図 7 に示す入力装置 2 1 0 から入力する湾曲形状パラメータを、以下の (58) 式で表す。

【0 1 4 0】

【数 3 5】

湾曲形状パラメータ $\tilde{\theta}_{ref}, \tilde{\zeta}_{ref}$ を以下の式で表す。

$$\tilde{\theta}_{ref} = [\tilde{\theta}_1 \ \tilde{\theta}_2 \ \dots \ \tilde{\theta}_e]^T, \quad \tilde{\zeta}_{ref} = [\tilde{\zeta}_1 \ \tilde{\zeta}_2 \ \dots \ \tilde{\zeta}_e]^T \quad \dots \quad (58)$$

40

【0 1 4 1】

この場合、運動学演算部 2 2 1 は、入力装置 1 1 0 から、上述の (58) 式に示す湾曲形状パラメータが入力されると、各湾曲部ごとに、以下に示す、基準面と当該基準面に最も近い第 2 のワイヤガイドの近位端との距離を表す距離情報である座標値を算出する。

【0 1 4 2】

【数 3 6】

ワイヤガイドの近位端の座標値 $\tilde{z}_{e1}, \dots, \tilde{z}_{ee}$

【0 1 4 3】

そして、切替判定部 2 2 2 は、各湾曲部ごとに、上述した座標値が閾値以下であるか否

50

かを判断し、当該判断の結果に基づいて、連続体ロボット 230 の駆動制御を行う。この具体的な連続体ロボット 230 の駆動制御は、図 7 を用いて上述した通りである。

【0144】

<湾曲角度の最大値>

次いで、運動学演算部 221 による運動学を用いて、図 8 に示す第 3 湾曲部 1340 の湾曲角度 θ_3 の最大値を算出する場合について説明する。

ここでは、直立姿勢時の各湾曲部 1320 ~ 1340 の中心軸 1304 の長さ l を 0.010 m とする。また、直立姿勢時の各湾曲部 1320 ~ 1340 における長さ $l_{aw1} \sim l_{aw3}$ は、いずれも 0.0092 m とする。また、第 1 実施形態と同様に、第 1 のワイヤガイドの遠位端における湾曲角度の制約は 270 度と設定し、本実施形態では、基準面に最も近い第 2 のワイヤガイドの近位端の接触が原因となる湾曲角度 θ_3 の最大値を算出する。第 3 湾曲部 1340 の湾曲角度 θ_3 の最大値は、それよりも基台部 1310 に近い第 1 湾曲部 1320 及び第 2 湾曲部 1330 の角度により変動する。そこで、ここでは、第 1 湾曲部 1320 及び第 2 湾曲部 1330 の湾曲形状パラメータを、以下の a) ~ d) に示す 4 通りでシミュレーションを行う。

【0145】

【数 37】

- a) $[\tilde{\theta}_1 \ \tilde{\theta}_2] = [0 \ 0]$ 度, $[\tilde{\zeta}_1 \ \tilde{\zeta}_2] = [0 \ 0]$ 度
- b) $[\tilde{\theta}_1 \ \tilde{\theta}_2] = [0 \ 60]$ 度, $[\tilde{\zeta}_1 \ \tilde{\zeta}_2] = [0 \ 30]$ 度
- c) $[\tilde{\theta}_1 \ \tilde{\theta}_2] = [60 \ 60]$ 度, $[\tilde{\zeta}_1 \ \tilde{\zeta}_2] = [180 \ 30]$ 度
- d) $[\tilde{\theta}_1 \ \tilde{\theta}_2] = [20 \ 60]$ 度, $[\tilde{\zeta}_1 \ \tilde{\zeta}_2] = [0 \ 30]$ 度

【0146】

この際、第 1 の実施形態と同様に、旋回角度 ζ_3 を 0 度から 1 度刻みで 359 度まで変化させ、各旋回角度 ζ_3 において湾曲角度 θ_3 を 0 度から 1 度刻みで 270 度まで変化させる。

【0147】

上述した (20) 式を用いて座標値 $z_{e3}(\theta_e)$ を算出し、それが閾値 (ここでは 0 とする) 以上となる範囲の最大湾曲角度を θ_{3max} とする。第 3 湾曲部 1340 を湾曲させない状態での、上述した a) ~ d) に示す湾曲形状パラメータに基づく連続体ロボット 230 の湾曲形状を、図 9 (a) ~ 図 9 (d) にそれぞれ示す。また、第 3 湾曲部 1340 を湾曲させない状態での、上述した a) ~ d) に示す湾曲形状パラメータに対応するシミュレーション応答を、図 10 にそれぞれ実線、破線、一点鎖線、点線で示す。

【0148】

図 10 において実線及び破線で示す、上述した a) 及び b) に示す湾曲形状パラメータでは、第 3 湾曲部 1340 の最大湾曲角度 θ_{3max} 及びそれが最小となる旋回角度 ζ_3 は、第 2 湾曲部 1330 が湾曲することにより変動することがわかる。さらに、図 10 において一点鎖線で示す、上述した c) に示す湾曲形状パラメータでは、第 2 湾曲部 1330 に加えて第 1 湾曲部 1320 を駆動しているが、図 9 (c) からわかるように、第 3 湾曲部 1340 の中心軸の長さが長くなる姿勢であるため、第 3 湾曲部 1340 の最大湾曲角度 θ_{3max} の最小値は大きくなる。一方、図 10 において点線で示す、上述した d) に示す湾曲形状パラメータでは、第 1 湾曲部 1320 を逆方向に湾曲駆動しているため、第 3 湾曲部 1340 の中心軸の長さが短くなり、第 3 湾曲部 1340 の最大湾曲角度 θ_{3max} の最小値は小さくなる。このように、最大湾曲角度 (θ_{3max}) は、全ての湾曲部の形状によって非線形に変動するため、一定の値で制限することが難しく、本実施形態で用いる運動学による接触回避制御は有効であることがわかる。なお、ここでのシミュレーションでは効果を示すため、直立姿勢における第 n 湾曲部の第 1 のワイヤガイドの遠位端と当該遠位端に

最も近い第 $n + 1$ 湾曲部の第 2 のワイヤガイドの近位端との隙間を 0.0008 m としている。この際、この隙間の値を大きくとれば、湾曲姿勢の制約は軽減される。

【0149】

以上説明したように、第 2 の実施形態では、切替判定部 222 は、運動学演算部 221 で算出された座標値 $z_{e1}(\theta_e), \dots, z_{ee}(\theta_e)$ に応じて、各湾曲部ごとに、当該座標値とともに運動学演算部 221 で算出されたワイヤ 1302 及び 1303 の駆動変位量のそれぞれに基づくワイヤ 1302 及び 1303 の駆動を行うか否かを制御（駆動制御）するようにしている。

かかる構成によれば、例えば挿抜経路 400 に沿って連続体ロボット 230 の各湾曲部を駆動させる際に（より詳細に、例えば各湾曲部を挿抜経路 400 に接触しないように駆動させる際に）、当該湾曲部の湾曲形状の基準面となる部材（基台部 1310 或いは第 1 のワイヤガイド）と当該湾曲部内の最も基準面に近い部材（第 2 のワイヤガイド）との接触を防止することができる。

【0150】

（第 3 の実施形態）

次に、本発明の第 3 の実施形態について説明する。なお、以下の第 3 の実施形態における説明では、第 1 の実施形態或いは第 2 の実施形態と共通する部分については必要に応じてその説明を省略し、第 1 の実施形態或いは第 2 の実施形態と異なる部分を中心に説明を行う。

【0151】

< 連続体ロボットの制御システムの構成例 >

図 11 は、本発明の第 3 の実施形態に係る連続体ロボットの制御システム 300 の構成例を示す模式図である。連続体ロボットの制御システム 300 は、図 11 に示すように、入力装置 310 と、制御装置 320 と、連続体ロボット 330 とを有して構成されている。

【0152】

まず、図 11 に示す連続体ロボット 330 の構成例について説明する。

第 2 の実施形態（第 1 の実施形態も同様）では、各湾曲部において、3 本のワイヤ 1301 ~ 1303 のうちの一部のワイヤ 1302 及び 1303 を所定ワイヤとして駆動させ、当該所定ワイヤを除く他のワイヤ 1301 を固定するものであった。第 3 の実施形態では、図 2 や図 8 に示すワイヤ 1301 も、駆動させる形態である。すなわち、第 3 の実施形態では、各湾曲部において、3 本のワイヤ 1301 ~ 1303 のうちの全部のワイヤ 1301 ~ 1303 を所定ワイヤとして駆動させる形態である。本実施形態の場合、図 2 や図 8 に示すワイヤ 1301 における基台部 1310 内部の一端に、図 2 に示すアクチュエータ 1311 及びアクチュエータ 1312 と同様の機能を有するアクチュエータを接続し、当該アクチュエータも制御する形態を採る。本実施形態では、湾曲部の中心軸 1304 の長さを湾曲形状によらずに一定とするように駆動することができる。しかしながら、各湾曲部の中心軸 1304 の長さをそれぞれ変動させるときには、上述した第 1 及び第 2 の実施形態で説明した運動学を用いて接触を回避する駆動制御が有効となる。

【0153】

ここで、図 11 に示す連続体ロボットの制御システム 300 では、図 8 に示す第 2 の実施形態の連続体ロボット 230 のワイヤ 1301 も駆動させる場合を示しているため、以下、この例について説明する。

【0154】

入力装置 310 は、 e 個の湾曲部における各湾曲部の湾曲形状パラメータである、当該各湾曲部の湾曲角度 θ の目標値である目標湾曲角度 θ_{ref} 、及び、当該各湾曲部の旋回角度 ζ の目標値である目標旋回角度 ζ_{ref} を、制御装置 120 に対して入力する。ここで、入力される目標湾曲角度 θ_{ref} 及び目標旋回角度 ζ_{ref} は、第 2 の実施形態で説明した相対座標系のものであるため、相対座標系であることを示す符号（ $\sim$ ）を上付している。また、入力装置 310 は、目標湾曲角度 θ_{ref} 及び目標旋回角度 ζ_{ref} からなる湾曲形状パラ

10

20

30

40

50

メータを時系列で（例えば、所定の離散時間ステップごとに）順次入力することが可能に構成されている。この際、入力装置 310 は、異なる値の目標湾曲角度 θ_{ref} 及び目標旋回角度 ζ_{ref} からなる湾曲形状パラメータを時系列で順次入力することも可能である。

【0155】

制御装置 320 は、入力装置 310 から入力された各湾曲部の湾曲形状パラメータに応じて、連続体ロボット 330 の駆動制御を行う。この制御装置 320 は、図 11 に示すように、運動学演算部 321 と、切替判定部 322 と、第 3 の切替部 223 と、記憶部 324 と、第 2 の切替部 325 - 1 ~ 325 - e を有して構成されている。具体的に、制御装置 320 は、各湾曲部ごとに、3 本のワイヤ 1301 ~ 1303 を駆動することにより立体的に形状の制御が可能な連続体ロボット 330 の運動学を導出する。そして、制御装置 320 は、各湾曲部ごとに、当該湾曲部の基準面と、当該基準面に最も近い第 2 のワイヤガイドの近位端との接触を回避するための制御を行う。

10

【0156】

運動学演算部 321 は、入力装置 310 からの各湾曲部の目標湾曲角度 θ_{ref} 及び目標旋回角度 ζ_{ref} の入力に応じて、ワイヤ 1301 の駆動変位量 l_{p1a} , l_{p2a} , ..., l_{pea} 、ワイヤ 1302 の駆動変位量 l_{p1b} , l_{p2b} , ..., l_{peb} 、及び、ワイヤ 1303 の駆動変位量 l_{p1c} , l_{p2c} , ..., l_{pec} を算出する。さらに、運動学演算部 321 は、入力装置 310 からの各湾曲部の目標湾曲角度 θ_{ref} 及び目標旋回角度 ζ_{ref} の入力に応じて、基準面と当該基準面に最も近い第 2 のワイヤガイドの近位端との距離を表す距離情報である座標値 $z_{e1}(\theta_e)$, ..., $z_{ee}(\theta_e)$ を算出する。ここで算出される座標値 $z_{e1}(\theta_e)$, ..., $z_{ee}(\theta_e)$ は、第 2 の実施形態で説明した相対座標系のものであるため、相対座標系であることを示す符号 (~) を上に付している。この駆動変位量 l_{p1a} , l_{p2a} , ..., l_{pea} 、駆動変位量 l_{p1b} , l_{p2b} , ..., l_{peb} 、駆動変位量 l_{p1c} , l_{p2c} , ..., l_{pec} 、及び、座標値 $z_{e1}(\theta_e)$, ..., $z_{ee}(\theta_e)$ を算出する運動学演算部 321 は、本発明の「算出手段」に相当する構成の一例である。

20

【0157】

切替判定部 322 は、運動学演算部 321 で算出された座標値 $z_{e1}(\theta_e)$, ..., $z_{ee}(\theta_e)$ に応じて、各湾曲部ごとに、当該座標値とともに運動学演算部 321 で算出された駆動変位量 l_{p1a} , l_{p2a} , ..., l_{pea} 、駆動変位量 l_{p1b} , l_{p2b} , ..., l_{peb} 及び駆動変位量 l_{p1c} , l_{p2c} , ..., l_{pec} のそれぞれに基づくワイヤ 1301、ワイヤ 1302 及び 1303 の駆動を行うか否かを制御（駆動制御）する。具体的に、切替判定部 322 は、各湾曲部ごとに、座標値 $z_{e1}(\theta_e)$, ..., $z_{ee}(\theta_e)$ が閾値以下であるか否かを判断し、当該判断の結果に基づいて、上述した駆動制御を行う。ここで、閾値として、例えば 0 を設定すれば、上述した座標値が閾値である 0 以下の場合には、各湾曲部において、当該湾曲部の基準面と当該基準面に最も近い第 2 のワイヤガイドの近位端とが接触することが想定される。この基準面と当該基準面に最も近い第 2 のワイヤガイドの近位端との接触の観点からは、閾値として 0 を設定することが好適である。しかしながら、本発明においてはこの態様に限定されるものではなく、接触に係る安全率を考慮して、閾値として所定の正の値を設定する態様も、本発明に適用可能である。

30

【0158】

各湾曲部ごとに算出された座標値 $z_{e1}(\theta_e)$, ..., $z_{ee}(\theta_e)$ のそれぞれについて当該座標値が閾値以下でない場合、切替判定部 322 は、当該湾曲部の基準面と当該基準面に最も近い第 2 のワイヤガイドの近位端とが接触するおそれが無いと判定する。この場合、切替判定部 322 は、各湾曲部ごとに、対応する第 1 の切替部 323 及び第 2 の切替部 325 (325 - 1 ~ 325 - e) を図 11 に示すように切り替える。具体的に、切替判定部 322 は、各湾曲部ごとに、対応する第 2 の切替部 325 を図 11 に示すように切り替えて、当該座標値とともに運動学演算部 321 で算出されたワイヤ 1301 ~ 1303 の駆動変位量を連続体ロボット 330 に出力する制御を行う。これにより、連続体ロボット 330 では、当該座標値とともに運動学演算部 321 で算出されたワイヤ 1301 ~ 1303 の駆動変位量のそれぞれに基づくワイヤ 1301 ~ 1303 の駆動が行われること

40

50

になる。また、この場合、切替判定部 3 2 2 は、各湾曲部ごとに、対応する第 1 の切替部 3 2 3 を図 1 1 に示すように切り替えて、当該座標値とともに運動学演算部 3 2 1 で算出されたワイヤ 1 3 0 1 ~ 1 3 0 3 の駆動変位量を記憶部 3 2 4 に記憶する制御を行う。このように、記憶部 3 2 4 には、上述した座標値が閾値以下でなかった場合（すなわち、接触するおそれが無いと判定された場合）に当該座標値とともに運動学演算部 3 2 1 で算出されたワイヤ 1 3 0 1 ~ 1 3 0 3 の駆動変位量が記憶される。

【0159】

一方、各湾曲部ごとに算出された座標値 $z_{e1}(\theta_e), \dots, z_{ee}(\theta_e)$ のそれぞれについて当該座標値が閾値以下である場合、切替判定部 3 2 2 は、当該湾曲部の基準面と当該基準面に最も近い第 2 のワイヤガイドの近位端とが接触するおそれが有ると判定する。この場合、切替判定部 3 2 2 は、各湾曲部ごとに、対応する第 1 の切替部 3 2 3 及び第 2 の切替部 3 2 5 (3 2 5 - 1 ~ 3 2 5 - e) を図 1 1 に示すものと逆方向に切り替える。すなわち、この場合、切替判定部 3 2 2 は、当該座標値とともに運動学演算部 3 2 1 で算出されたワイヤ 1 3 0 1 ~ 1 3 0 3 の駆動変位量のそれぞれに基づくワイヤ 1 3 0 1 ~ 1 3 0 3 の駆動を行わないように制御する。具体的に、まず、切替判定部 3 2 2 は、各湾曲部ごとに、対応する第 1 の切替部 3 2 3 を図 1 1 に示すものと逆方向に切り替えて、当該座標値とともに運動学演算部 3 2 1 で算出されたワイヤ 1 3 0 1 ~ 1 3 0 3 の駆動変位量を記憶部 3 2 4 に記憶しない制御を行う。これにより、記憶部 3 2 4 には、各湾曲部ごとに、上述した座標値が閾値以下でなかった場合（すなわち、接触するおそれが無いと判定された場合）に当該座標値とともに運動学演算部 3 2 1 で算出されたワイヤ 1 3 0 1 ~ 1 3 0 3 の駆動変位量のみが記憶される。また、切替判定部 3 2 2 は、各湾曲部ごとに、対応する第 2 の切替部 3 2 5 を図 1 1 に示すものと逆方向に切り替えて、当該座標値とともに運動学演算部 3 2 1 で算出されたワイヤ 1 3 0 1 ~ 1 3 0 3 の駆動変位量を連続体ロボット 3 3 0 に出力しない制御を行う。これにより、連続体ロボット 3 3 0 では、当該座標値とともに運動学演算部 3 2 1 で算出されたワイヤ 1 3 0 1 ~ 1 3 0 3 の駆動変位量のそれぞれに基づくワイヤ 1 3 0 1 ~ 1 3 0 3 の駆動が行われず、上述した接触を回避することができる。より詳細に、この場合、切替判定部 3 2 2 は、各湾曲部ごとに、対応する第 2 の切替部 3 2 5 を図 1 1 に示すものと逆方向に切り替えて、予め記憶部 3 2 4 に記憶されている、以前に運動学演算部 3 2 1 で当該湾曲部について算出され上述した座標値が閾値以下でなかった場合（すなわち、接触するおそれが無いと判定された場合）に当該座標値とともに算出されたワイヤ 1 3 0 1 ~ 1 3 0 3 の駆動変位量を連続体ロボット 3 3 0 に出力する制御を行う。これにより、連続体ロボット 3 3 0 では、各湾曲部ごとに、上述した接触を回避しつつ、当該各湾曲部の駆動が行われることになる。

【0160】

なお、本実施形態においては、記憶部 3 2 4 に、各湾曲部ごとに、運動学演算部 3 2 1 で算出された所定の駆動変位量を記憶するようにしているが、本発明においてはこの形態に限定されるものではない。例えば、運動学演算部 3 2 1 で算出されたものではなく、各湾曲部ごとに、上述した接触を回避できることが検証されたワイヤ 1 3 0 1 ~ 1 3 0 3 の駆動変位量を予め記憶しておく形態も、本発明に適用可能である。また、切替判定部 3 2 2 は、本発明の「判定手段」に相当する構成の一例である。

【0161】

図 1 1 に示す制御装置 3 2 0 の運動学演算部 3 2 1、切替判定部 3 2 2、第 1 の切替部 3 2 3、記憶部 3 2 4 及び第 2 の切替部 3 2 5 - 1 ~ 3 2 5 - e は、ハードウェアで構成されていても、ソフトウェアで構成されていてもよい。ここで、図 1 1 に示す制御装置 3 2 0 の各構成部 3 2 1 ~ 3 2 5 がソフトウェアで構成されている場合には、例えばコンピュータの CPU が ROM 等の記憶媒体に記憶されているプログラムを実行することにより、各構成部 3 2 1 ~ 3 2 5 の機能が実現される。

【0162】

次いで、制御装置 3 2 0 の具体的な処理例について説明する。

なお、以下の説明では、連続体ロボット 3 3 0 に n 個の湾曲部が設けられている場合に

ついて説明する。

【 0 1 6 3 】

本実施形態では、まず、第 n 湾曲部の湾曲角度とその第 1 のワイヤガイドの遠位端の座標との関係を導出する。相対座標系 (x_n, y_n, z_n) における第 n 湾曲部の第 1 のワイヤガイドの遠位端の座標は、第 n 湾曲部の中心軸の長さを l_{nd} とすると、以下の (5 9) 式 ~ (6 1) 式となる。

【 0 1 6 4 】

【 数 3 8 】

相対座標系 (x_n, y_n, z_n) における第 n 湾曲部の遠位端の座標 $(\tilde{x}_{tn}, \tilde{y}_{tn}, \tilde{z}_{tn})$ は、第 n 湾曲部の中心軸の長さを l_{nd} とすると、以下の式で表される。

10

$$\tilde{x}_{tn} = \frac{l_{nd}}{\tilde{\theta}_n} (1 - \cos \tilde{\theta}_n) \cos(\tilde{\zeta}_n + \xi_n) \quad \dots \quad (59)$$

$$\tilde{y}_{tn} = \frac{l_{nd}}{\tilde{\theta}_n} (1 - \cos \tilde{\theta}_n) \sin(\tilde{\zeta}_n + \xi_n) \quad \dots \quad (60)$$

$$\tilde{z}_{tn} = \frac{l_{nd}}{\tilde{\theta}_n} \sin \tilde{\theta}_n \quad \dots \quad (61)$$

20

【 0 1 6 5 】

これにより、絶対座標系における第 n 湾曲部の第 1 のワイヤガイドの遠位端の座標 (x_{tn}, y_{tn}, z_{tn}) は、回転変換行列を用いて、以下の (6 2) 式となる。

【 0 1 6 6 】

【 数 3 9 】

$$\begin{bmatrix} x_{tn} \\ y_{tn} \\ z_{tn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{t1} \\ y_{t1} \\ z_{t1} \end{bmatrix} + \sum_{m=2}^n \prod_{k=1}^{m-1} R_z(\tilde{\zeta}_k + \xi_k) R_y(\tilde{\theta}_k) \begin{bmatrix} \tilde{x}_{tm} \\ \tilde{y}_{tm} \\ \tilde{z}_{tm} \end{bmatrix} \quad \dots \quad (62)$$

30

【 0 1 6 7 】

第 n 湾曲部の第 1 のワイヤガイドの遠位端の中心から長さ l_{en} にある第 2 のワイヤガイドの近位端の外周の変位については、以下に示す相対座標系における座標を求める。また、当該第 2 のワイヤガイドの中心座標を以下に示す座標として記載する。

【 0 1 6 8 】

【 数 4 0 】

相対座標系における座標 $(\tilde{x}_{en}, \tilde{y}_{en}, \tilde{z}_{en})$ を求める。

ワイヤガイドの中心座標を $(\tilde{x}_{en0}, \tilde{y}_{en0}, \tilde{z}_{en0})$ とする。

40

【 0 1 6 9 】

そして、以下の (6 3) 式を定義する。

【 0 1 7 0 】

【 数 4 1 】

$$l_{wn} = l_{nd} - l_{en}, \quad \tilde{\theta}_{wn} = \frac{l_{wn}}{l_{nd}} \tilde{\theta}_n \quad \dots \quad (63)$$

【 0 1 7 1 】

この場合、上述した第 2 のワイヤガイドの中心座標は、以下の (6 4) 式 ~ (6 6) 式となる。

50

【 0 1 7 2 】

【 数 4 2 】

$$\tilde{x}_{en0} = \frac{l_{wn}}{\tilde{\theta}_{wn}}(1 - \cos \tilde{\theta}_{wn}) \cos \tilde{\zeta}_n \quad \dots \quad (64)$$

$$\tilde{y}_{en0} = \frac{l_{wn}}{\tilde{\theta}_{wn}}(1 - \cos \tilde{\theta}_{wn}) \sin \tilde{\zeta}_n \quad \dots \quad (65)$$

$$\tilde{z}_{en0} = \frac{l_{wn}}{\tilde{\theta}_{wn}} \sin \tilde{\theta}_{wn} \quad \dots \quad (66)$$

10

【 0 1 7 3 】

このことから、上述した第 n 湾曲部の第 1 のワイヤガイドの遠位端の中心から長さ l_{en} にある第 2 のワイヤガイドの近位端の外周の相対座標系における座標は、以下の (6 7) 式となる。

【 0 1 7 4 】

【 数 4 3 】

$$\begin{bmatrix} \tilde{x}_{en} \\ \tilde{y}_{en} \\ \tilde{z}_{en} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{en0} \\ \tilde{y}_{en0} \\ \tilde{z}_{en0} \end{bmatrix} + R_z(\tilde{\zeta}_n) R_y(\tilde{\theta}_n) \begin{bmatrix} r_{wg} \cos \theta_e \\ r_{wg} \sin \theta_e \\ 0 \end{bmatrix} \quad \dots \quad (67)$$

20

【 0 1 7 5 】

次いで、第 n 湾曲部のワイヤ 1 3 0 1 ~ 1 3 0 3 の駆動変位量 l_{pna} , l_{pnb} , l_{pnc} と、第 n 湾曲部の湾曲角度 θ_n 及び旋回角度 ζ_n との関係を導出する。ただし、 n は 2 以上とする。相対座標系 (x_n , y_n , z_n) における各ワイヤの駆動変位量と第 1 湾曲部の湾曲角度との関係は、以下の (6 8) 式 ~ (7 0) 式ようになる。

【 0 1 7 6 】

【 数 4 4 】

相対座標系 (x_n , y_n , z_n) におけるワイヤの駆動変位量 $\tilde{l}_{pn}$ と第 1 湾曲部の遠位端の角度 $\tilde{\theta}_n$ との関係は、以下のようになる。

30

$$\tilde{l}_{pna} = \frac{r_s}{\sqrt{3}} \cos(\tilde{\zeta}_n - \xi_n) \tilde{\theta}_n \quad \dots \quad (68)$$

$$\tilde{l}_{pnb} = \frac{r_s}{\sqrt{3}} \cos\left(\frac{\pi}{6} + \tilde{\zeta}_n - \xi_n\right) \tilde{\theta}_n \quad \dots \quad (69)$$

$$\tilde{l}_{pnc} = \frac{r_s}{\sqrt{3}} \cos\left(\frac{\pi}{6} - \tilde{\zeta}_n + \xi_n\right) \tilde{\theta}_n \quad \dots \quad (70)$$

40

【 0 1 7 7 】

第 n 湾曲部におけるワイヤ 1 3 0 1 ~ 1 3 0 3 の駆動変位量 l_{pna} , l_{pnb} , l_{pnc} は、第 1 湾曲部から第 $n - 1$ 湾曲部までの相対座標系における第 n 湾曲部を駆動するためのワイヤの変位の総和となり、以下の (7 1) 式となる。

【 0 1 7 8 】

【 数 4 5 】

$$l_{pna} = \sum_{m=1}^n \tilde{l}_{pma}, \quad l_{pnb} = \sum_{m=1}^n \tilde{l}_{pmb}, \quad l_{pnc} = \sum_{m=1}^n \tilde{l}_{pmc} \quad \dots \quad (71)$$

50

【 0 1 7 9 】

なお、図 1 1 に示す第 3 の実施形態に係る連続体ロボットの制御システム 3 0 0 では、図 8 に示す第 2 の実施形態の連続体ロボット 2 3 0 のワイヤ 1 3 0 1 も駆動させる例を示したが、本発明においてはこの形態に限定されるものではない。例えば、第 3 の実施形態に係る連続体ロボットの制御システム 3 0 0 として、図 2 に示す第 1 の実施形態の連続体ロボット 1 3 0 のワイヤ 1 3 0 1 も駆動させる形態も、本発明に適用可能である。

【 0 1 8 0 】

以上説明したように、第 3 の実施形態では、切替判定部 3 2 2 は、運動学演算部 3 2 1 で算出された座標値 $z_{e1}(\theta_e), \dots, z_{ee}(\theta_e)$ に応じて、各湾曲部ごとに、当該座標値とともに運動学演算部 2 2 1 で算出されたワイヤ 1 3 0 1 ~ 1 3 0 3 の駆動変位量のそれぞれに基づくワイヤ 1 3 0 1 ~ 1 3 0 3 の駆動を行うか否かを制御（駆動制御）するようにしている。

10

かかる構成によれば、例えば挿抜経路 4 0 0 に沿って連続体ロボット 3 3 0 の各湾曲部を駆動させる際に（より詳細に、例えば各湾曲部を挿抜経路 4 0 0 に接触しないように駆動させる際に）、当該湾曲部の湾曲形状の基準面となる部材（基台部 1 3 1 0 或いは第 1 のワイヤガイド）と当該湾曲部内の最も基準面に近い部材（第 2 のワイヤガイド）との接触を防止することができる。

【 0 1 8 1 】

（第 4 の実施形態）

次に、本発明の第 4 の実施形態について説明する。

20

【 0 1 8 2 】

上述の第 2 及び第 3 の実施形態においては、複数の湾曲部を有する連続体ロボットに対して湾曲部ごとに相対座標系を導入し、運動学の導出と制御系の設計を行う場合を示した。本実施形態では、絶対座標系による第 2 のワイヤガイドの接触回避を伴う制御を対象とする。

【 0 1 8 3 】

まず、相対角度から絶対座標系における第 n 湾曲部の湾曲角度 θ_n 及び旋回角度 ζ_n を求める手順を示す。

【 0 1 8 4 】

第 n 湾曲部の相対座標系において、各湾曲形状の延長線上に遠位端から長さ 1 の位置（ $x_{ttn}, y_{ttn}, z_{ttn}$ ）を取ると、その座標は、以下の（72）式となる。ただし、以下の座標では、相対座標系であることを示す符号（ $\sim$ ）を上につけている。

30

【 0 1 8 5 】

【 数 4 6 】

第 n 湾曲部の相対座標系において、各湾曲形状の延長線上に遠位端から長さ 1 の位置

$(\tilde{x}_{ttn}, \tilde{y}_{ttn}, \tilde{z}_{ttn})$ を取ると、その座標は、以下のようになる。

$$\begin{bmatrix} \tilde{x}_{ttn} \\ \tilde{y}_{ttn} \\ \tilde{z}_{ttn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{tn} \\ \tilde{y}_{tn} \\ \tilde{z}_{tn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \zeta \sin \tilde{\theta} \\ \sin \zeta \sin \tilde{\theta} \\ \cos \tilde{\theta} \end{bmatrix} \quad \dots \quad (72)$$

40

【 0 1 8 6 】

そして、絶対座標系における位置（ $x_{ttn}, y_{ttn}, z_{ttn}$ ）は、回転変換行列を用いると、以下の（73）式となる。

【 0 1 8 7 】

【数 4 7】

$$\begin{bmatrix} x_{ttn} \\ y_{ttn} \\ z_{ttn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{t1} \\ y_{t1} \\ z_{t1} \end{bmatrix} + \sum_{m=2}^{n-1} \prod_{k=1}^{m-1} R_z(\tilde{\zeta}_k + \xi_k) R_y(\tilde{\theta}_k) \begin{bmatrix} \tilde{x}_{tm} \\ \tilde{y}_{tm} \\ \tilde{z}_{tm} \end{bmatrix} + \prod_{k=1}^n R_z(\tilde{\zeta}_n + \xi_n) R_y(\tilde{\theta}_n) \begin{bmatrix} \tilde{x}_{ttn} \\ \tilde{y}_{ttn} \\ \tilde{z}_{ttn} \end{bmatrix} \quad \dots \quad (73)$$

【0 1 8 8】

これを用いて、以下の(74)式に示す単位ベクトル e_{zn} を定義する。

【0 1 8 9】

10

【数 4 8】

$$e_{zn} = (x_{ttn} - x_{tn}, y_{ttn} - y_{tn}, z_{ttn} - z_{tn}) \quad \dots \quad (74)$$

【0 1 9 0】

単位ベクトル e_{zn} は、第 n 湾曲部の遠位端の絶対座標系における方向を表し、 z 軸からの角度が湾曲角度 θ_n となり、単位ベクトル e_{zn} の $x-y$ 平面への射影の x 軸からの角度が旋回角度 ζ_n となる。絶対角度から相対角度を求めるには、単位ベクトル e_{zn} の方向に第 $n+1$ 湾曲部に対する相対座標系の z_{n+1} 軸をとり、第 n 湾曲部の相対座標系の $w_n z_n$ 平面上において z_{n+1} 軸と直交する方向に x_{n+1} 軸をとる。右手系より第 $n+1$ 湾曲部の相対座標系が定義されるので、座標軸と単位ベクトル e_{zn+1} との関係から相対角度が求められる。第 1 湾曲部は相対角度と絶対角度が等しいので、これを近位端から繰り返すことで、全ての湾曲部の相対角度を求めることができる。

20

【0 1 9 1】

絶対座標系を用いると、第 n 湾曲部のワイヤ 1302 の駆動変位量 l_{pnb} 及びワイヤ 1303 の駆動変位量 l_{pnc} は、それぞれ、以下の(75)式及び(76)式となる。

【0 1 9 2】

【数 4 9】

$$l_{pnb} = r_s \cos\left(\frac{\pi}{6} + \zeta_n - \xi_n\right) \theta_n \quad \dots \quad (75)$$

30

$$l_{pnc} = r_s \cos\left(\frac{\pi}{6} - \zeta_n + \xi_n\right) \theta_n \quad \dots \quad (76)$$

【0 1 9 3】

これは、第 2 の実施形態のような回転変換を必要としないため、演算量が少ない。また、絶対座標系で設定される経路に最遠位湾曲部の角度を追従させる制御では、絶対座標系による制御が簡便となる。しかし、第 2 のワイヤガイドの接触を回避するためには、上記の手順により絶対角度から相対角度を求め、第 2 の実施形態に示した接触判断を行う必要があり、演算量が増えてしまう。そこで、絶対座標系において簡易的に第 2 のワイヤガイドの接触を回避する手法を以下に示す。

40

【0 1 9 4】

隣接する 2 つの湾曲部である第 $n-1$ 湾曲部と第 n 湾曲部に対し、接触を回避するために第 n 湾曲部の湾曲角度 θ_n を、その相対座標系における湾曲角度 θ_{lim} に制約することを考える。例えば旋回角度 ζ_{n-1} と旋回角度 ζ_n が等しい場合、湾曲角度の差分 ($\theta_n - \theta_{n-1}$) に以下の(77)式に示す制約を設ければよい。

【0 1 9 5】

【数 5 0】

$$-\tilde{\theta}_{lim} < \theta_n - \theta_{n-1} < \tilde{\theta}_{lim} \quad \dots \quad (77)$$

50

【 0 1 9 6 】

一方、例えば旋回角度 ζ_{n-1} と旋回角度 ζ_n とが 90 度の差をもつ場合は、以下の (7 8) 式に示す制約を設ければよい。

【 0 1 9 7 】

【 数 5 1 】

$$-\tilde{\theta}_{lim} < \theta_n < \tilde{\theta}_{lim} \quad \dots \quad (78)$$

【 0 1 9 8 】

そこで、旋回角度の差分 ($\zeta_n - \zeta_{n-1}$) を引数とする関数 α を導入して以下の (7 9) 式で表し、湾曲角度 θ_n を以下の (8 0) 式に示すように制約すればよい。

10

【 0 1 9 9 】

【 数 5 2 】

$$\alpha = \cos((\zeta_n - \zeta_{n-1}) \bmod 2\pi) \quad \dots \quad (79)$$

$$-\tilde{\theta}_{lim} + \alpha\theta_{n-1} < \theta_n < \tilde{\theta}_{lim} + \alpha\theta_{n-1} \quad \dots \quad (80)$$

【 0 2 0 0 】

このようにすることで、絶対座標系においても隣接する湾曲部のワイヤガイド同士が接触することを回避することが可能となる。

【 0 2 0 1 】

20

(その他の実施形態)

本発明は、上述の実施形態の 1 以上の機能を実現するプログラムを、ネットワーク又は記憶媒体を介してシステム又は装置に供給し、そのシステム又は装置のコンピュータにおける 1 つ以上のプロセッサがプログラムを読み出し実行する処理でも実現可能である。また、1 以上の機能を実現する回路 (例えば、ASIC) によっても実現可能である。

このプログラム及び当該プログラムを記憶したコンピュータ読み取り可能な記憶媒体は、本発明に含まれる。

【 0 2 0 2 】

なお、上述した本発明の実施形態は、いずれも本発明を実施するにあたっての具体化の例を示したものに過ぎず、これらによって本発明の技術的範囲が限定的に解釈されてはならないものである。すなわち、本発明はその技術思想、又はその主要な特徴から逸脱することなく、様々な形で実施することができる。

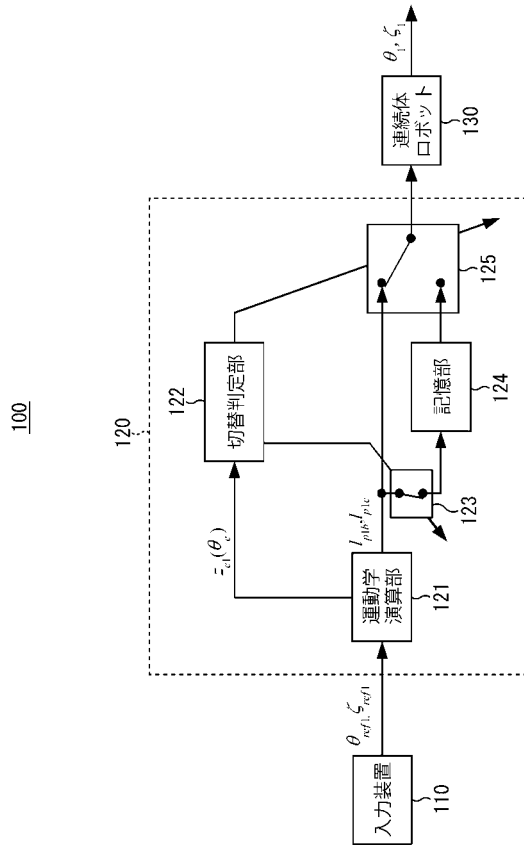
30

【 符号の説明 】

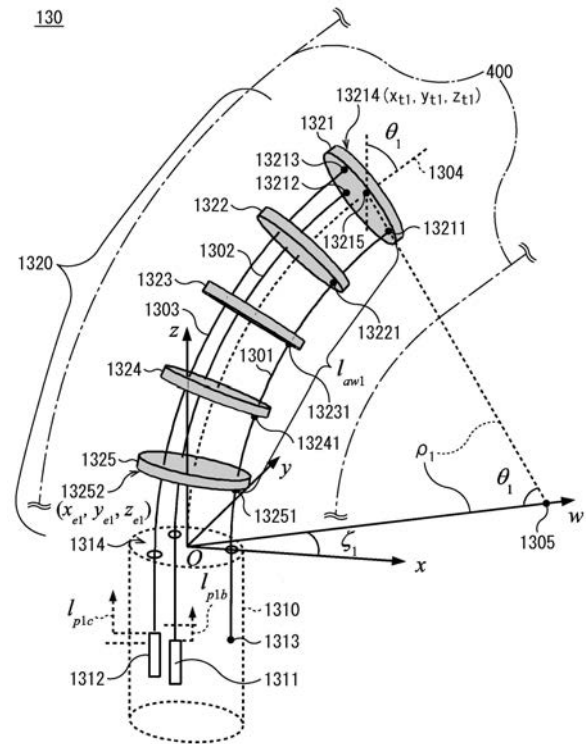
【 0 2 0 3 】

1 0 0 : 連続体ロボットの制御システム、 1 1 0 : 入力装置、 1 2 0 : 制御装置、 1 2 1 : 運動学演算部、 1 2 2 : 切替判定部、 1 2 3 : 第 1 の切替部、 1 2 4 : 記憶部、 1 2 5 : 第 2 の切替部、 1 3 0 : 連続体ロボット

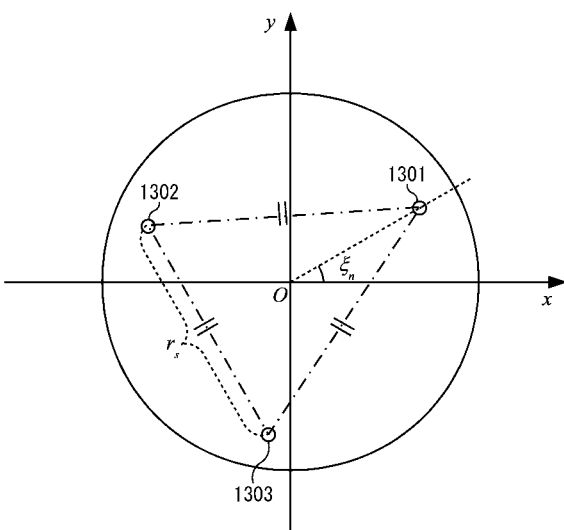
【図 1】



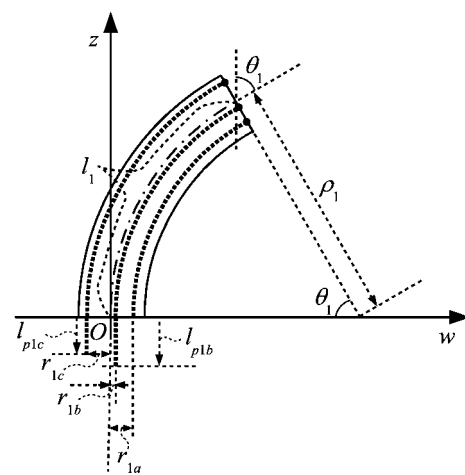
【図 2】



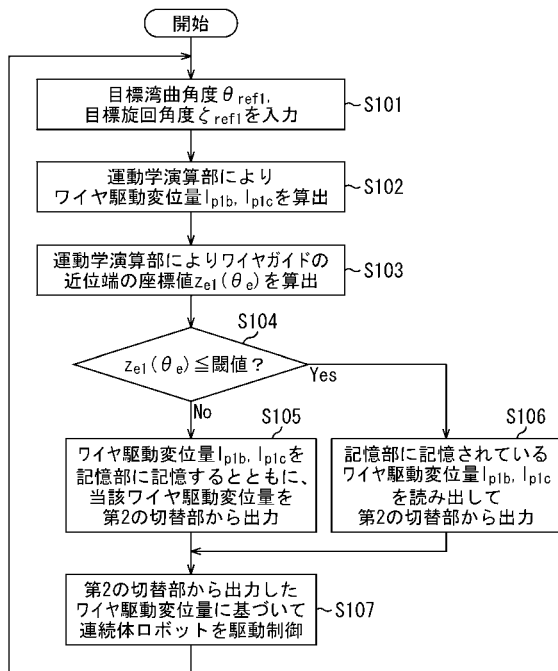
【図 3】



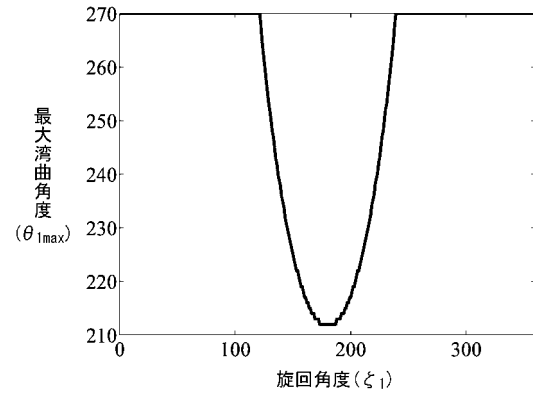
【図 4】



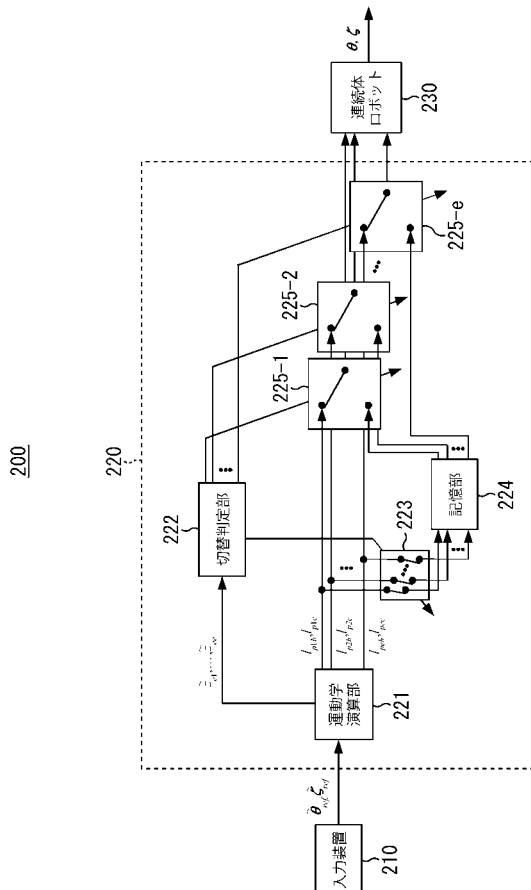
【図 5】



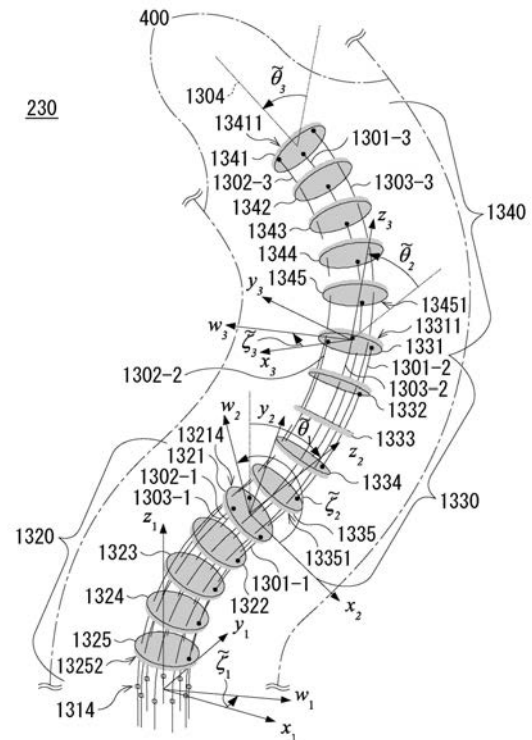
【図 6】



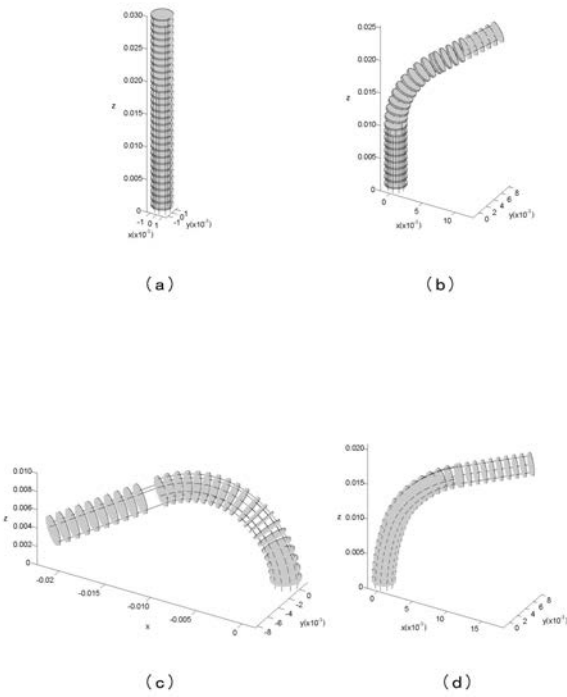
【図 7】



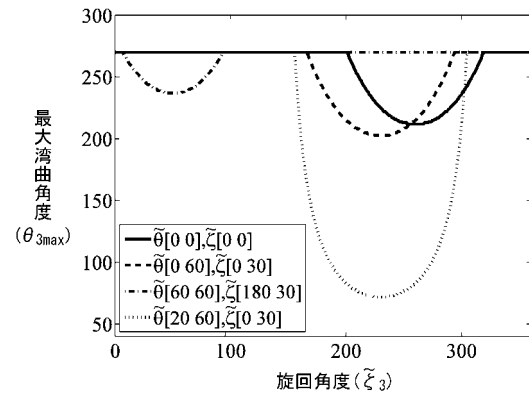
【図 8】



【図 9】



【図 10】



【図 11】

