

外観を変え、 空間をデザインするための 曲面を構成するロボット

信州大学 繊維学部 機械・ロボット学科

作動可微分多様体研究室

助教 岩本 憲泰

2024年8月1日

変形する曲面状の構造体

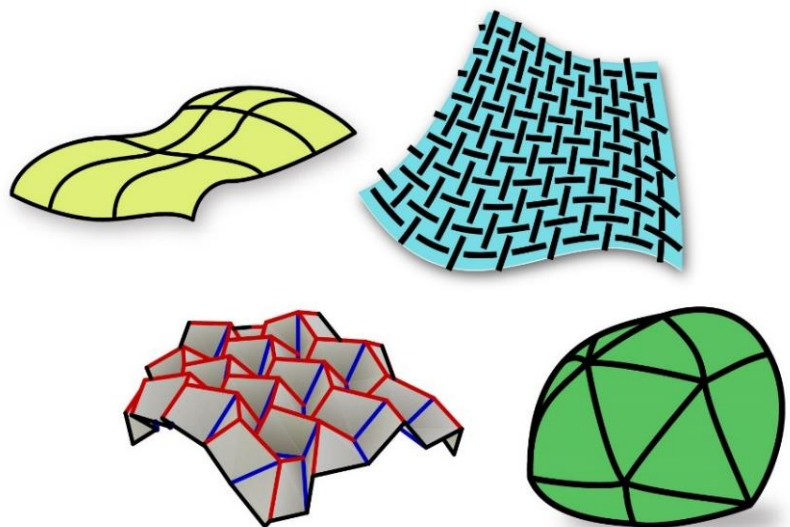
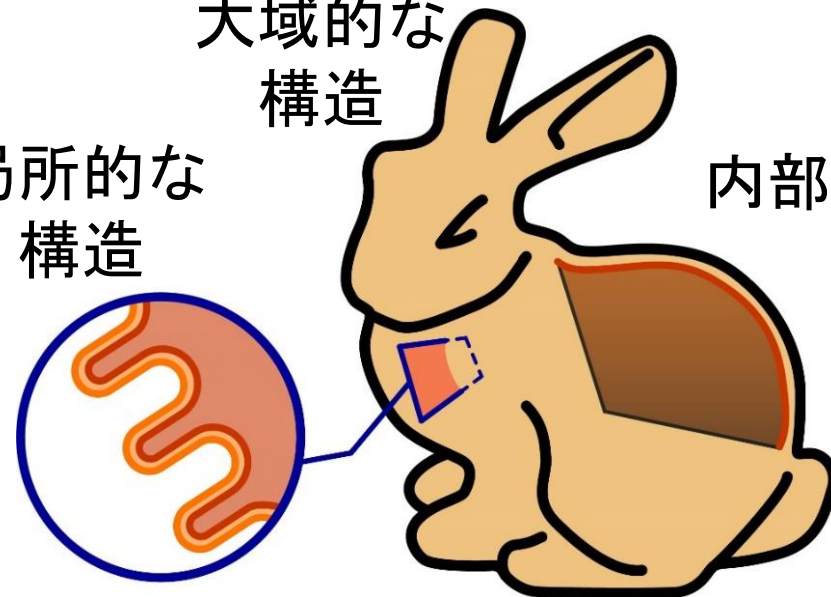
幅に対して厚みが小さなロボット



大域的な
構造

局所的な
構造

内部空間



① 構造をどう設計するか

② 所望の形を制御でどう実現するか

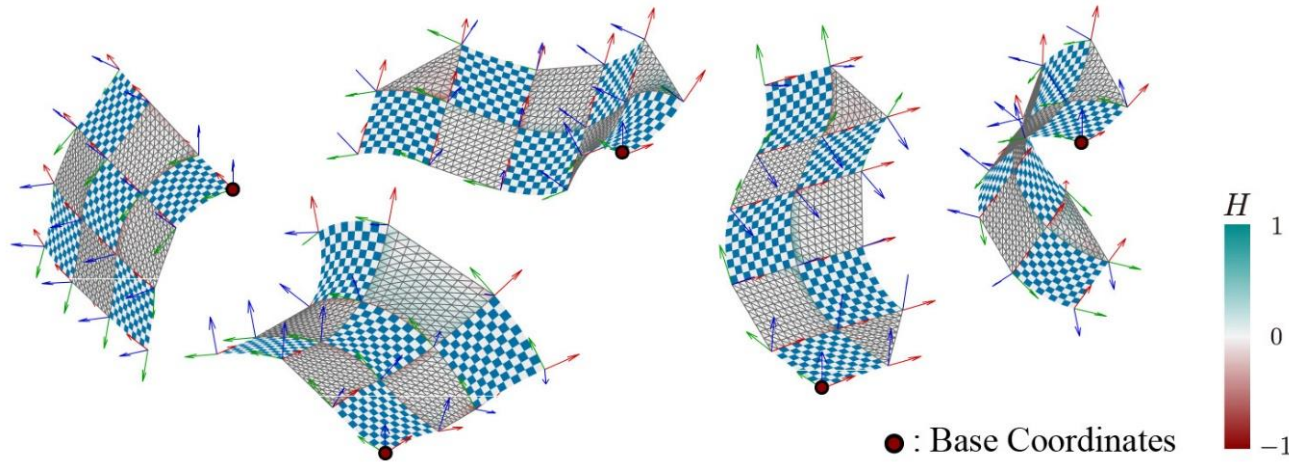
どんな状態か: センサの情報 → 自身の形

どう動くか:

アクチュエータの制御量 → 実現される形

本発表の内容

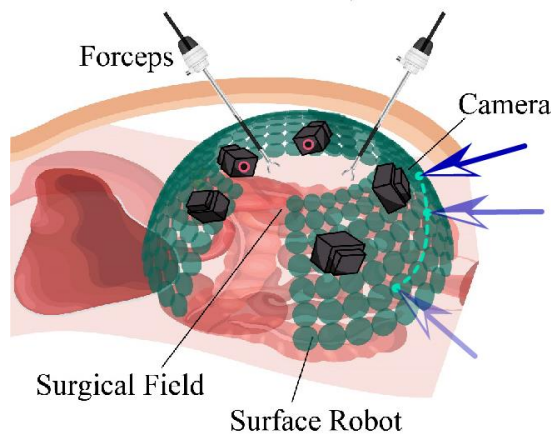
区分的に平均曲率一定な曲面状の構造体(ロボット)



知的財産①

その一つの応用先として...

腹腔鏡手術における術野空間の情報を取得するシステム



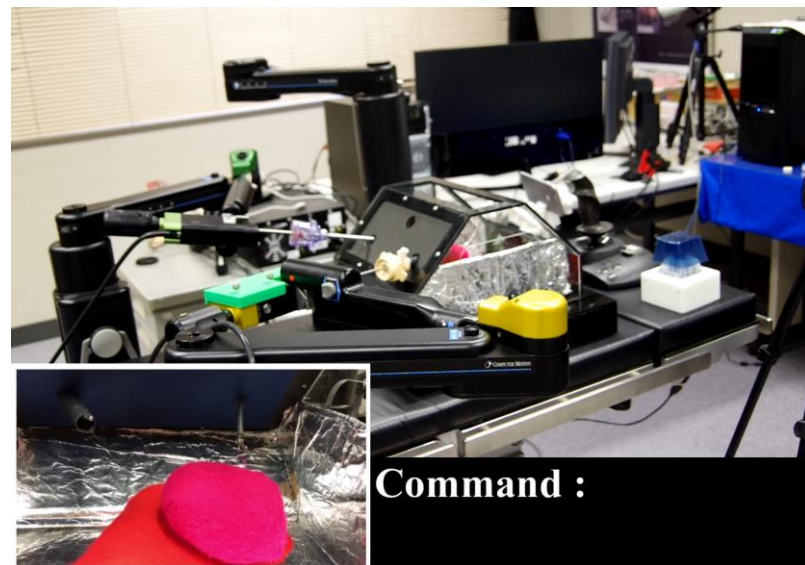
知的財産②

手術支援ロボットの自律化

Haideggerらによる自律レベル(LoA)の定義

- LoA0 : ヒトの操作のみ
- LoA1 : 術者のアシスト
- LoA2 : 特定のタスク実行
- LoA3 : 外科医の監視下で手術の大部分
- LoA4 : ロボットによる手術 (外科医必要)
- LoA5 : ロボットによる手術 (外科医必要無し)

より高度な
自律レベルへ



手術支援ロボットシステム ZEUS

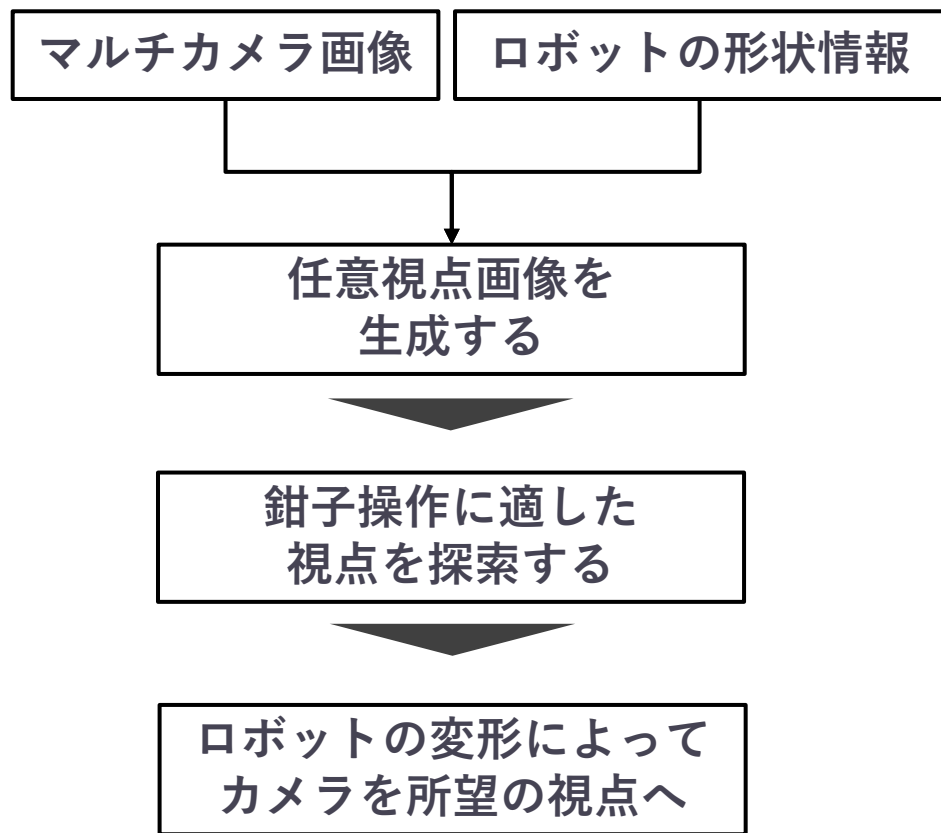
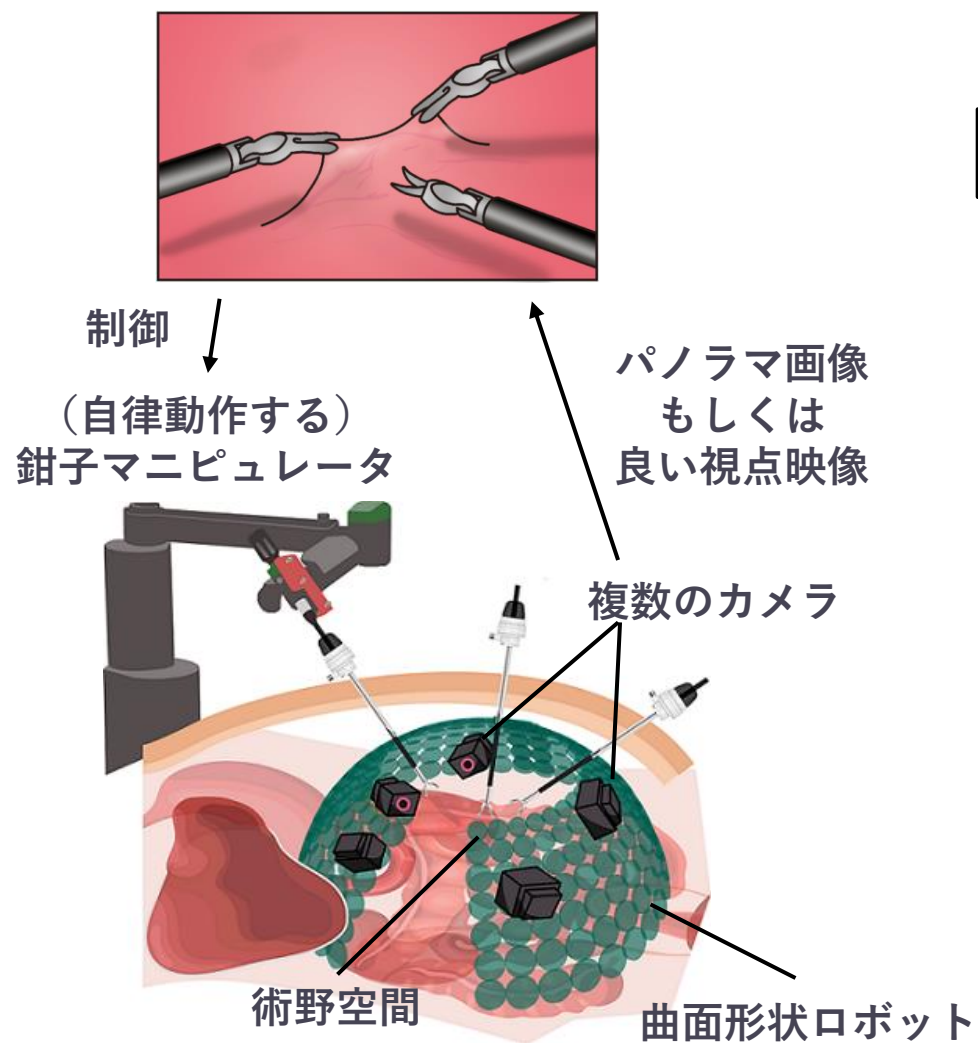
腹腔内の情報拡充が必須

自律動作の基となる情報を
取得する機器に冗長性があるか？

- 三次元化 : ステレオ内視鏡,
プレノプティックカメラ
- 高解像度化 : 8K内視鏡
- 死角の削減 : 術中MRI, 術中CT,
カメラ付きトロッカー

鉗子操作に依存しない映像や, 回り込んだ位置からの映像が欲しい

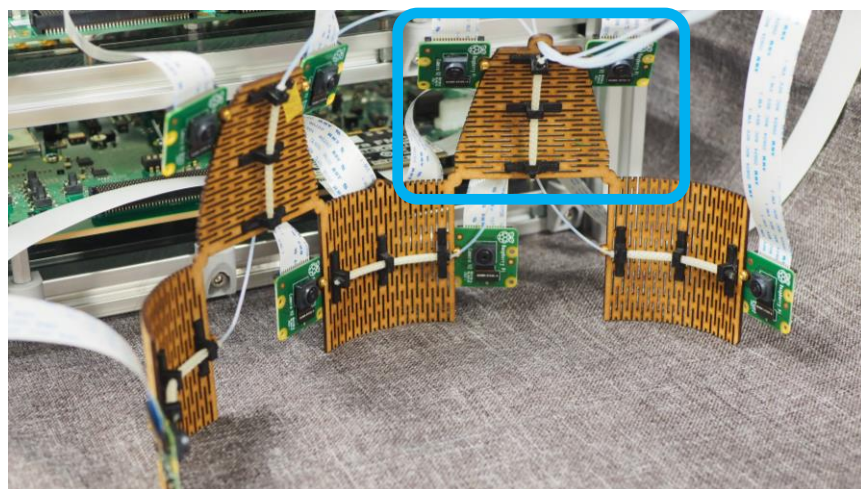
術野空間情報取得システム



術野空間の映像を多方向から取得し、
鉗子マニピュレータの安全な動作を実現することを目的としている

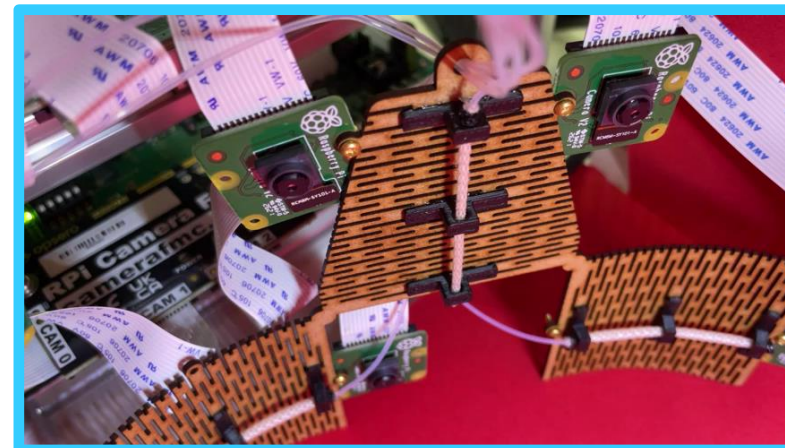
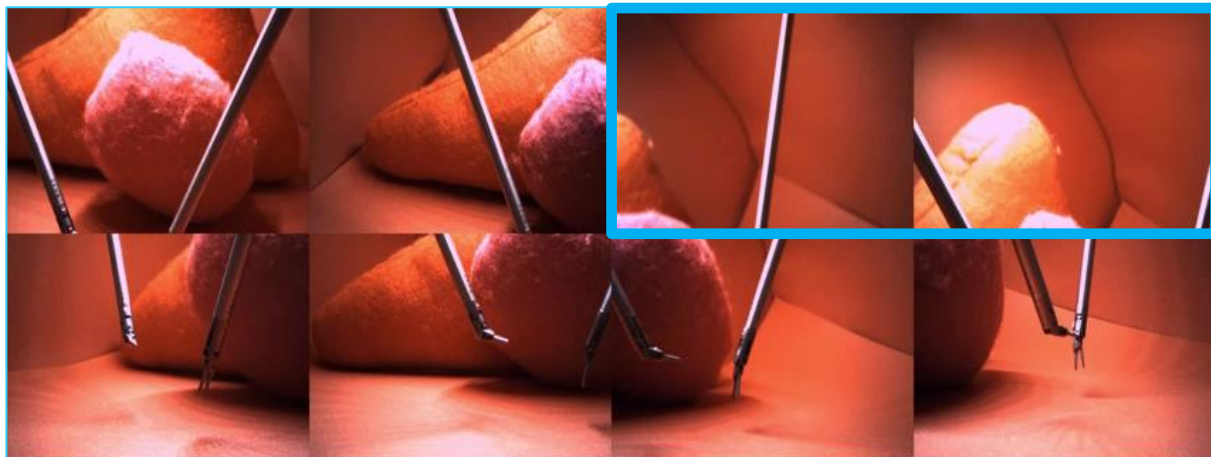
現在までに試作しているシステム

- ・ 曲面形状ロボット
- ・ McKibben型人工筋による屈曲



マルチカメラシステム

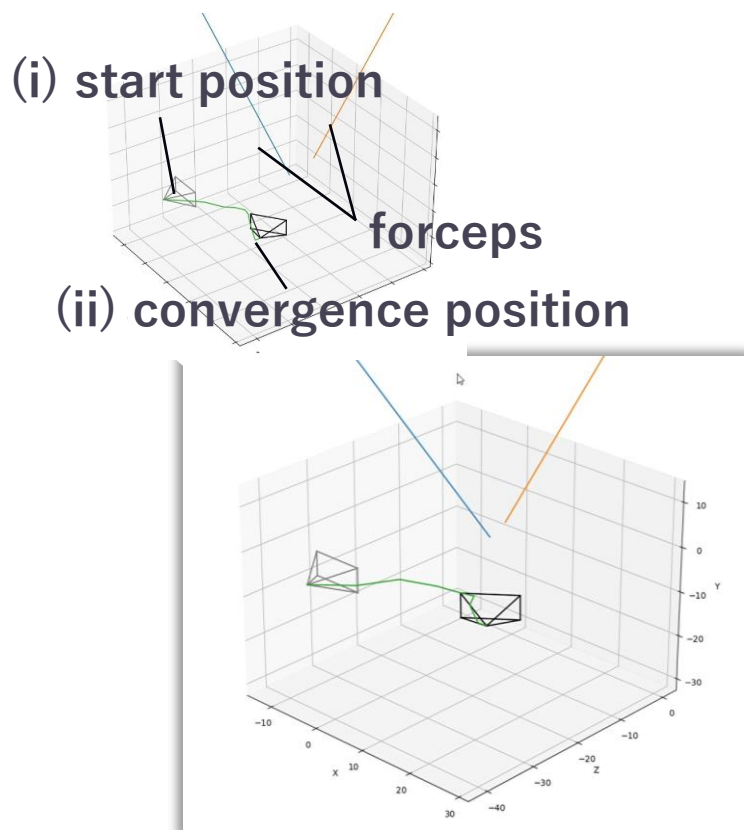
- ・ FPGA基板2枚
(ZCU102, ZCU106, Xilinx社)
- ・ 8個のカメラ



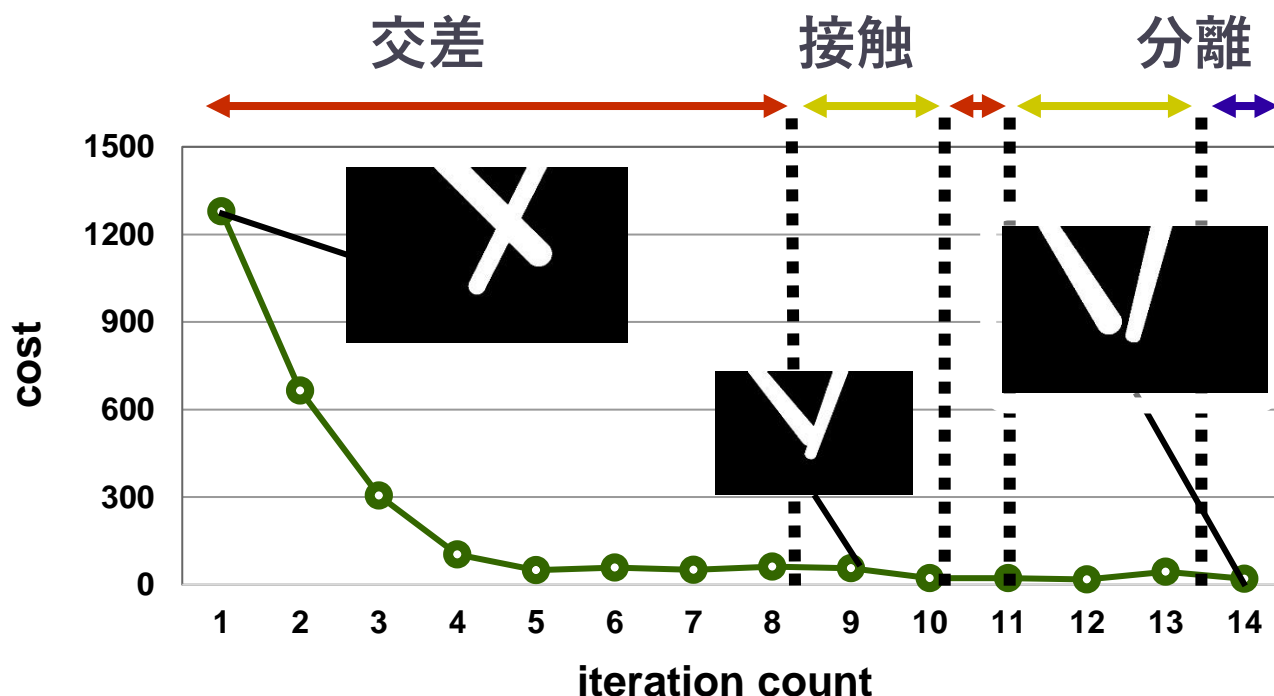
画像から外れた鉗子先端をロボットの変形によって捕捉

良い視点の探索

- 条件**
- ・ 探索領域を半径90 mmの球面とした最急降下法
 - ・ 鉗子は静止状態



評価値の推移と取得画像



鉗子領域が分離した視点を取得

カメラ位置の把握や制御のためには、
設置されている曲面形状ロボットの形の制御と推定が重要

ロボット工学の基礎

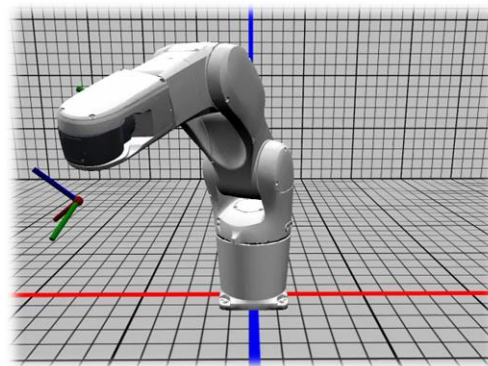
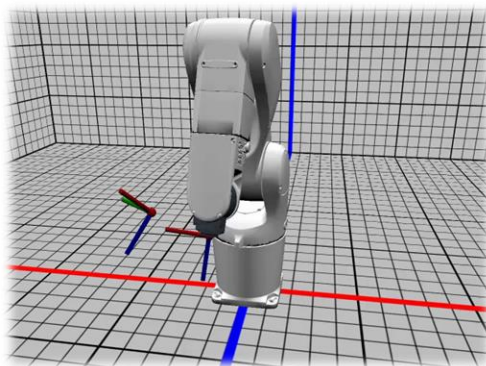
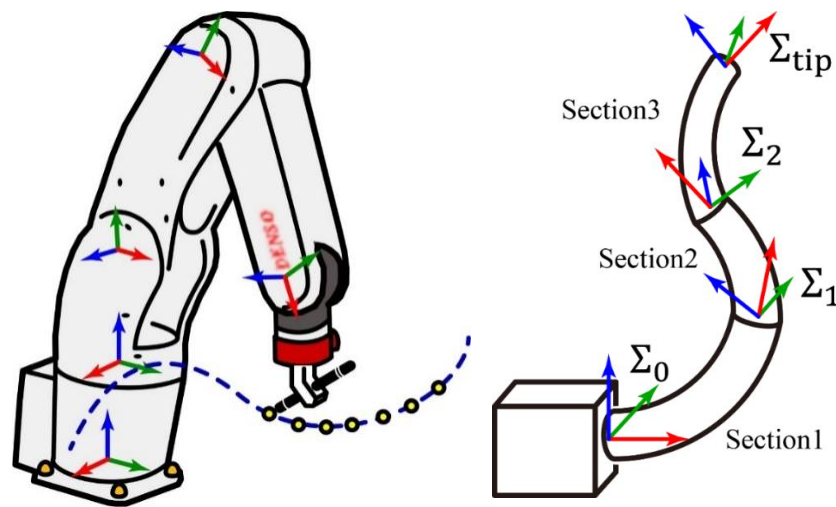
◇ 座標系の設定

◇ 順運動学

各関節角度 → 手先位置姿勢

◇ 逆運動学

手先位置姿勢 → 各関節角度

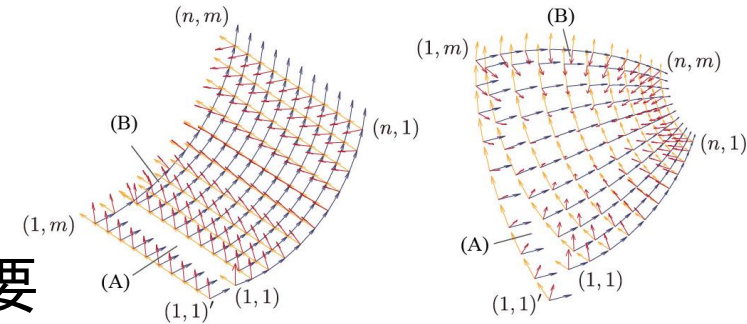


- 逆運動学は最適化問題に帰着される
- 逆運動学1回を計算するうえで、順運動学を複数回計算
順運動学の計算時間は短いことが好ましい

従来技術とその問題点

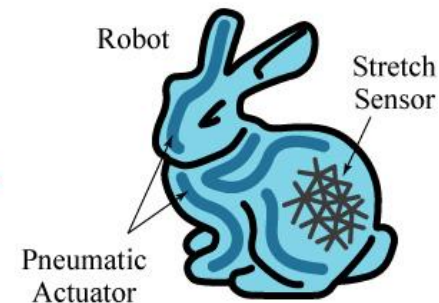
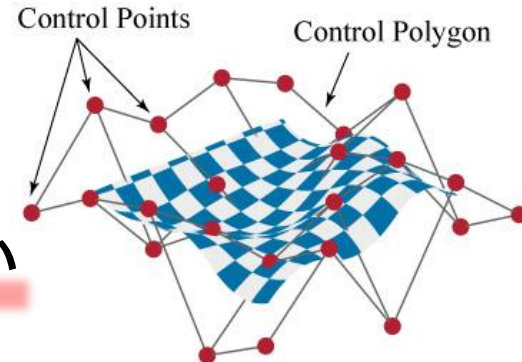
微分幾何学的な観点

- ◇ 曲面を表現するのに曲面上の各点での変数が必要
さらに、その変数は可積分であるという条件を満たす必要あり
- ◇ 順運動学計算: 曲面を表現する変数から全体形状の算出
一般的には、境界条件付きの偏微分方程式を数值的に解く
→ ロボットの場合、境界形状が変化、境界条件を設定できない
→ 大規模連立方程式を解くことになるため、計算時間が大きい



Computer Graphicsで用いられるスプライン曲面

- ◇ 曲面から飛び出た制御点
→ ロボットに沿ったアクチュエータや
センサの情報を結びづけることが難しい

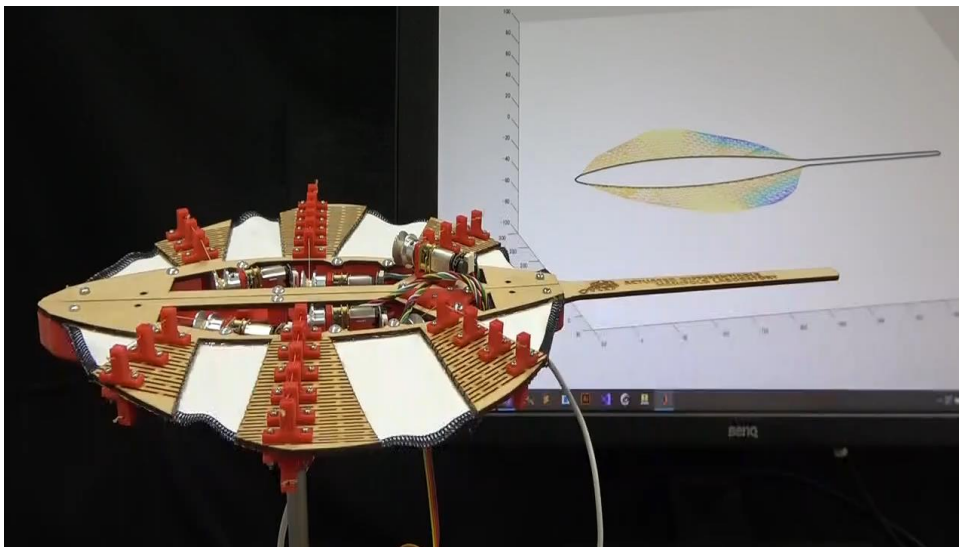
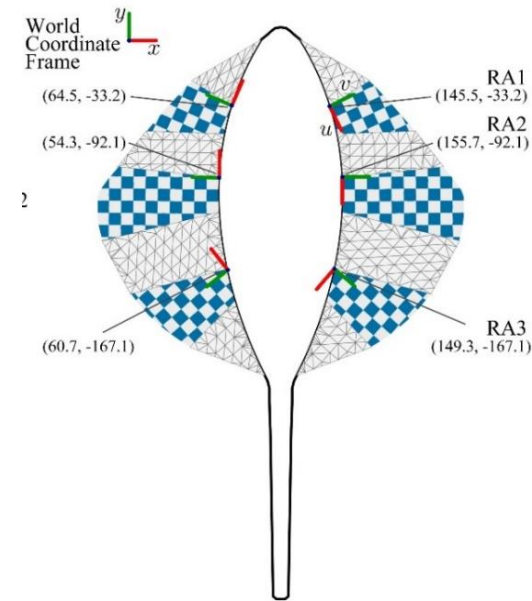
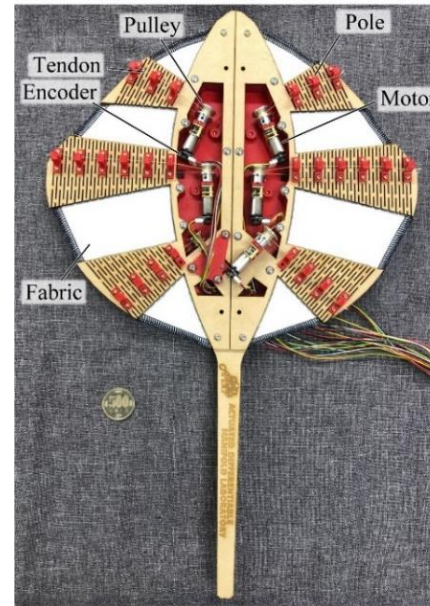


新技術の特徴・従来技術との比較

- ◇ 新しい曲面の離散化方法
(平均曲率一定な回転面＋極小曲面の貼り合わせ方)
- ◇ 形を表現するのに必要な変数が少ない
- ◇ 曲面全体の境界形状は事前に与えなくてよい
- ◇ 曲面上の1点が与えられた位置と一致する形状を算出可能
つまり逆運動学
- ◇ 形の情報の圧縮・復元アルゴリズムともいえる

エイ型ロボットの鰭への適用

- ◇生物模倣ロボットの膜状部位は、剛体や弾性材料と柔軟体の組合せ
- ◇膜状部位の形を高速で推定できればその形の制御、周囲の流れの制御に活用できる
- ◇円柱面状に屈曲するアクチュエータと布を交互に貼り合わせた鰭



鰭形状のリアルタイム推定(10 ms程度)

ロボット

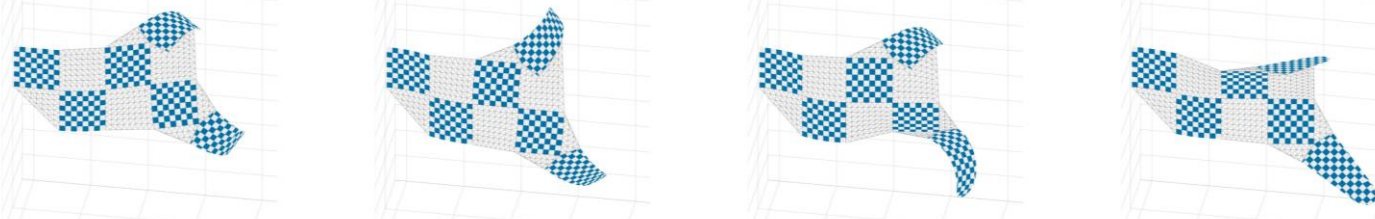
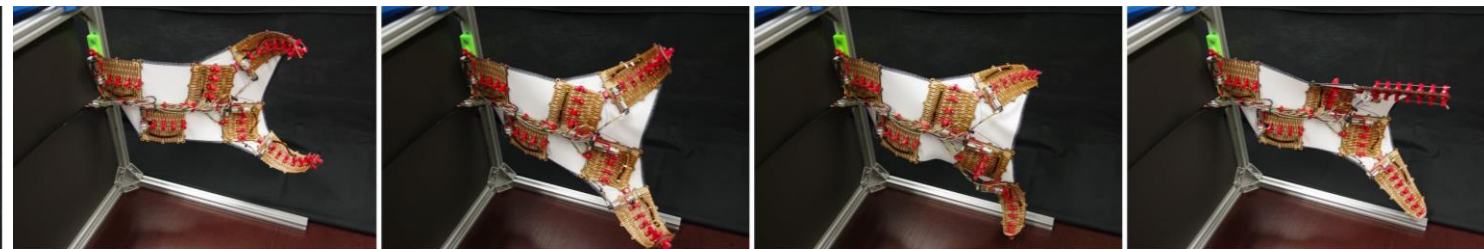
モータのエンコーダ値 →
屈曲アクチュエータの曲率

6つの曲率の値

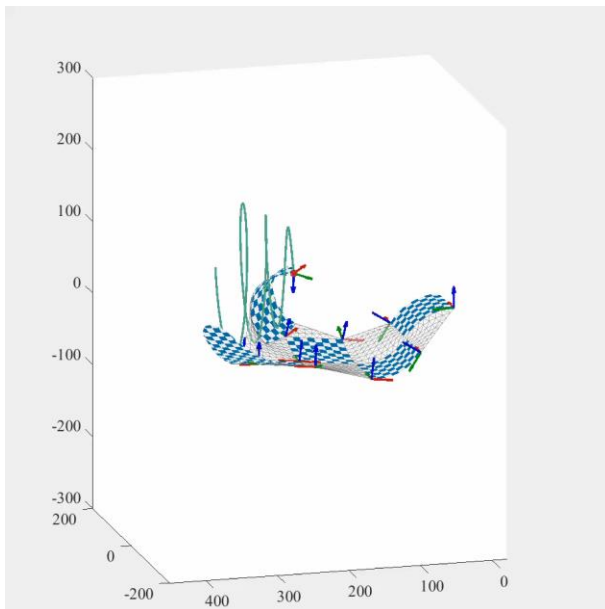
PC

屈曲アクチュエータの曲率
→各アクチュエータの形状
→布まで含めた鰭の全体形状

二指ハンドへの適用



制御点を目標位置に一致させる逆運動学を解くことができる

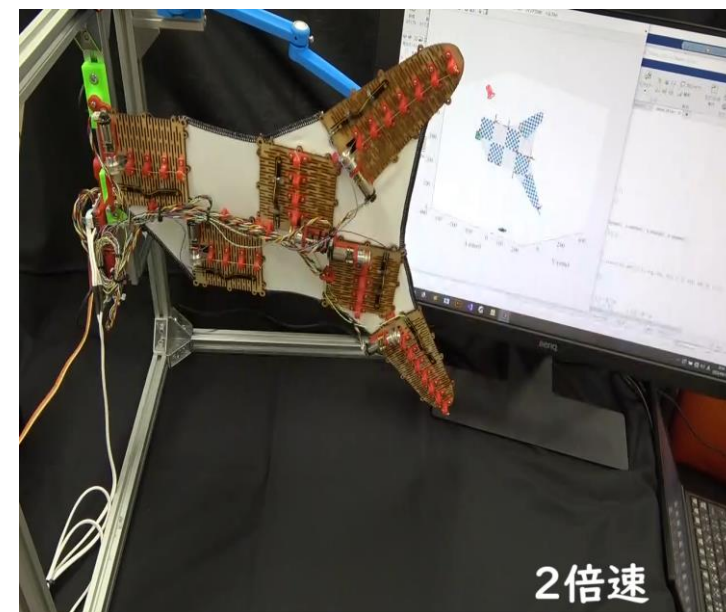


PC

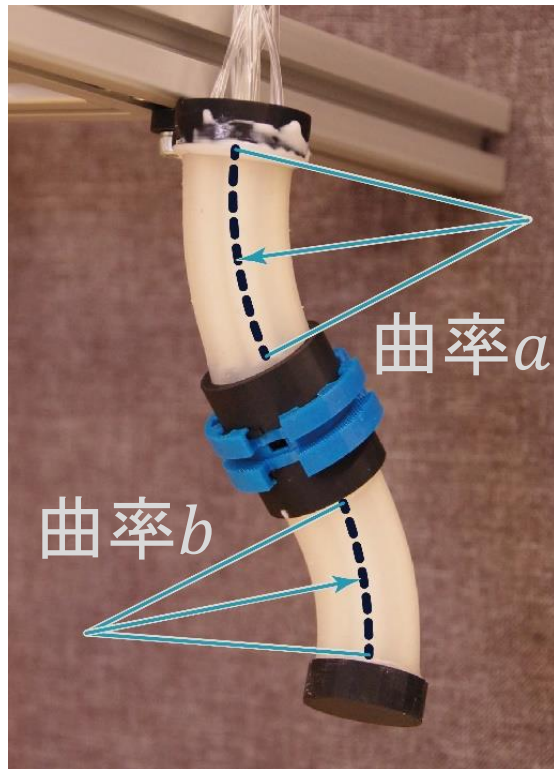
カメラ画像 → ARマーカ位置 →
各屈曲アクチュエータの曲率
(逆運動学計算)

ロボット

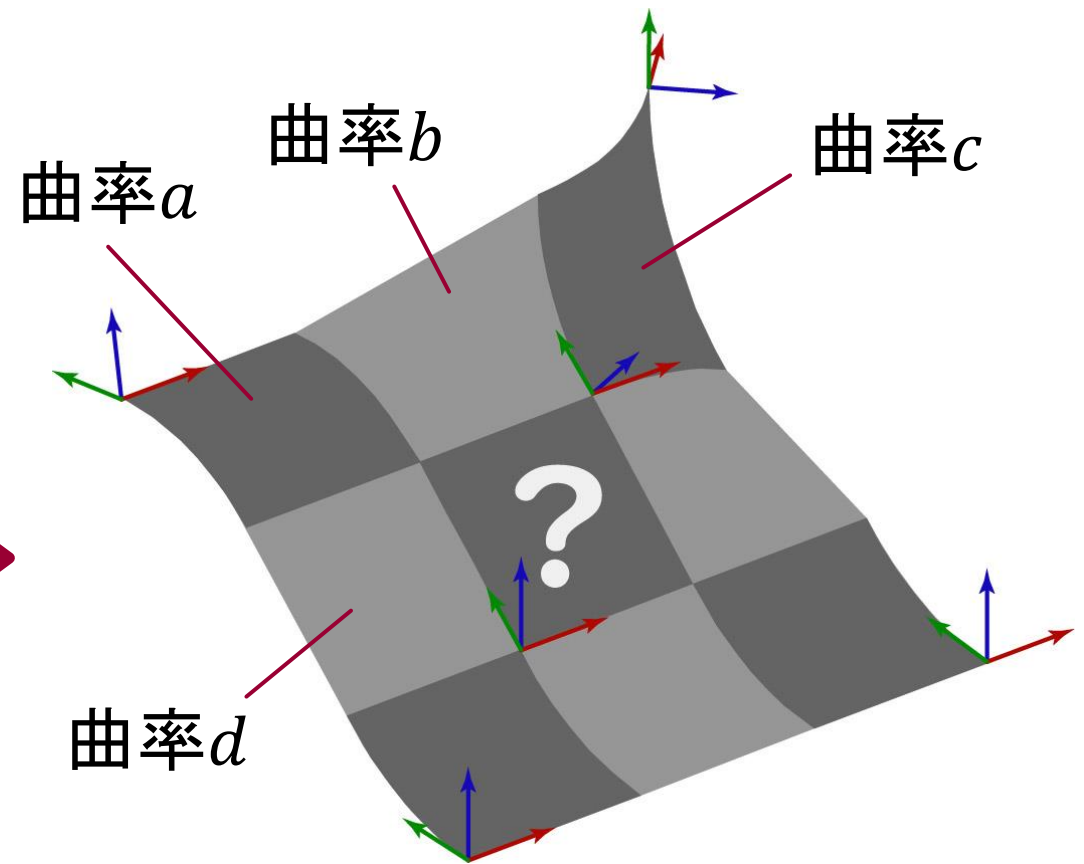
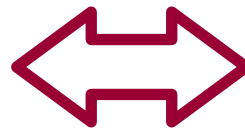
各屈曲アクチュエータの曲率
→ モータの角度: 位置制御



本技術のアイデア



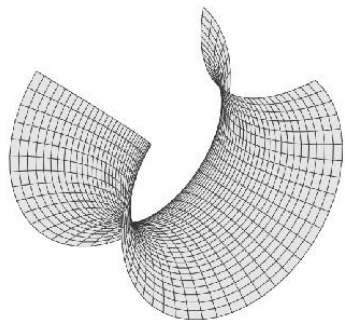
区分的に曲率一定な
連続マニピュレータ



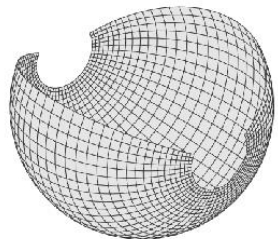
区分的に曲率一定な
曲面形状ロボット

- ◇ マニピュレータの構造に依存しない，幾何学的な計算が存在
- ◇ 考え方・計算が容易であり，多くの連続マニピュレータで利用

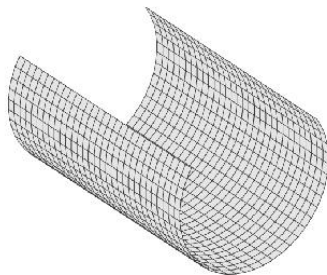
平均曲率一定な曲面



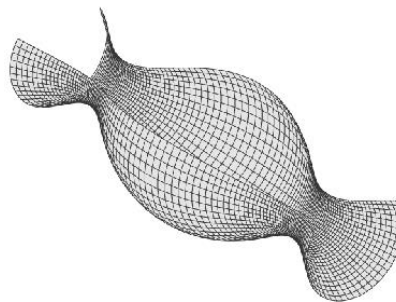
Catenoid



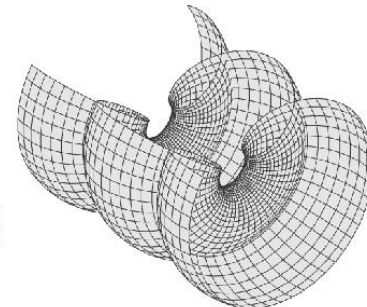
Sphere



Cylinder

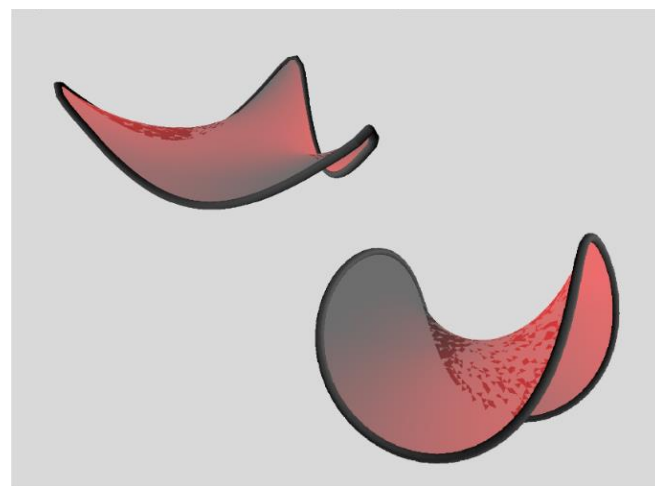
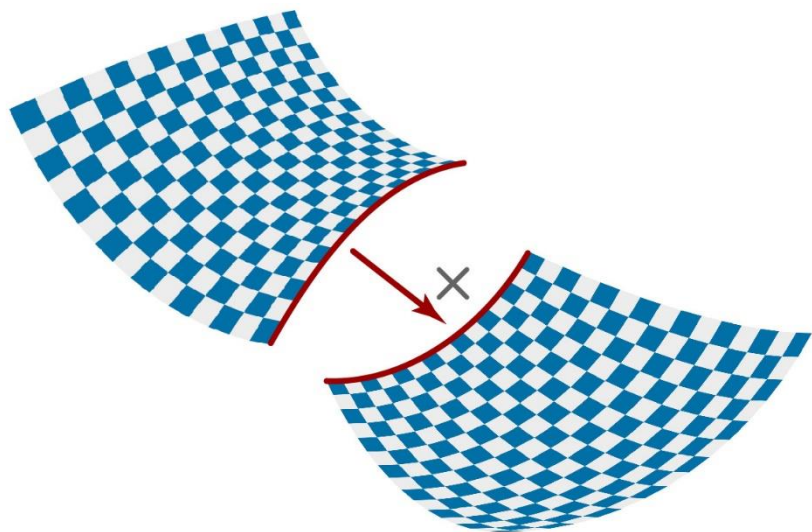


Unduloid



Nodoid

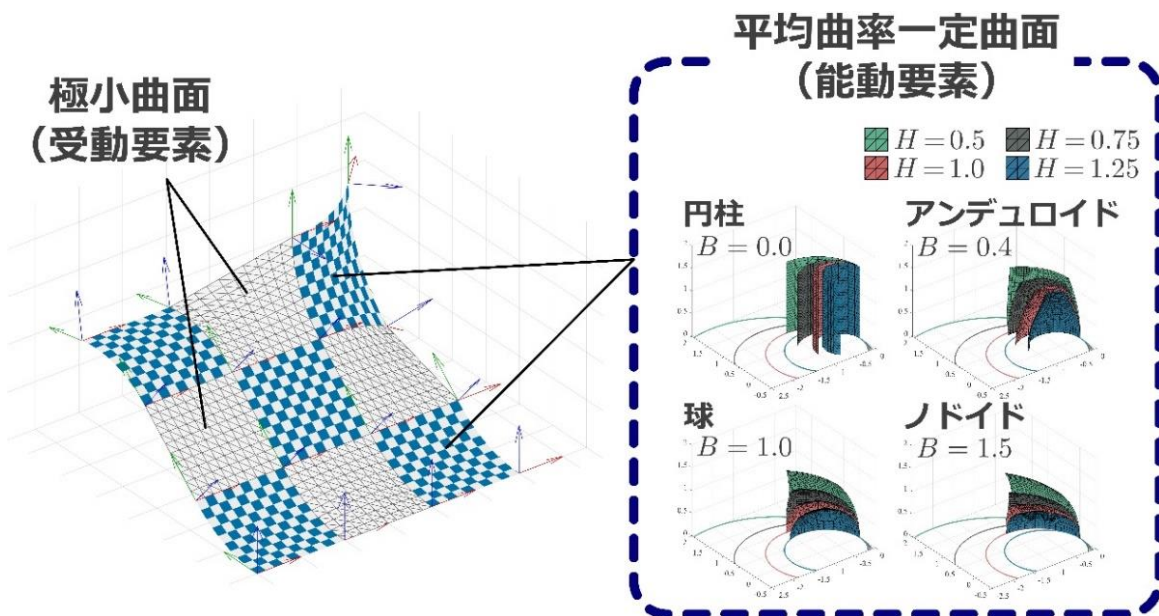
ただし、上の曲面を直接
貼り合わせることはできない



極小曲面(与えられた枠に張る
面積が最小の曲面):
平均曲率はいたるところでゼロ

区分的に平均曲率一定な曲面

市松模様状に平均曲率一定な回転面と極小曲面を貼り合わせる



回転面部：
曲面形状アクチュエータ

極小曲面部：
伸縮性の高い布やゴム膜
周囲の形に追従する
アクチュエータ

◇回転面の記述に剣持の表現公式を利用
幾何形状 B , 平均曲率 H , 伸び率 ℓ

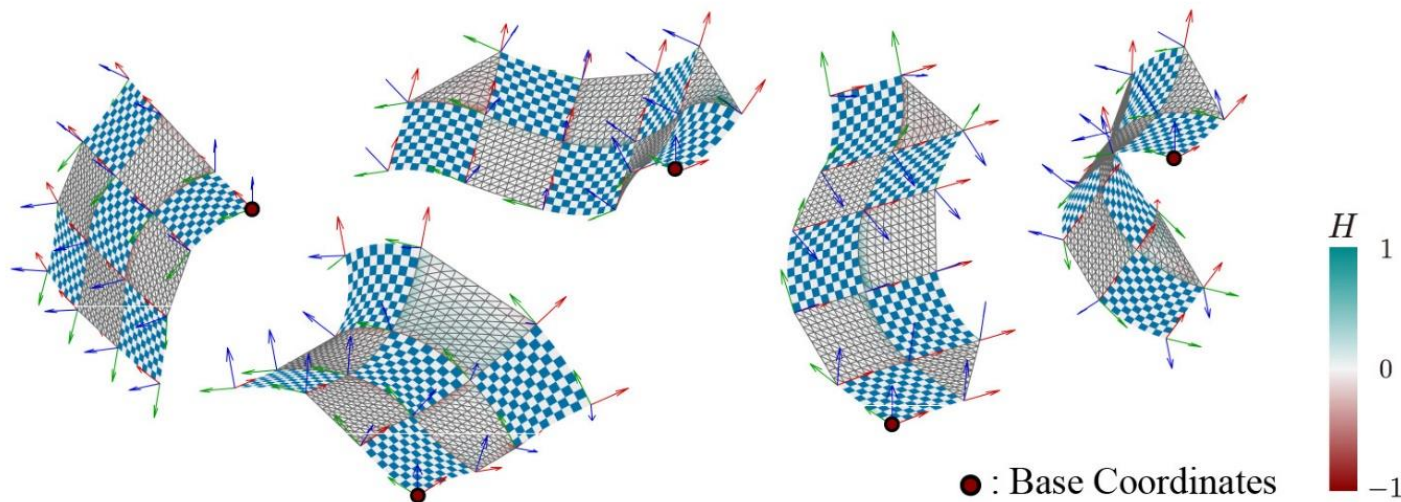
◇表現に必要なパラメータ数は回転面の数の3倍

少ない!!

◇回転面上の点の位置・姿勢はパラメータの各要素で偏微分可能

ヤコビ行列が得られる!!

順運動学



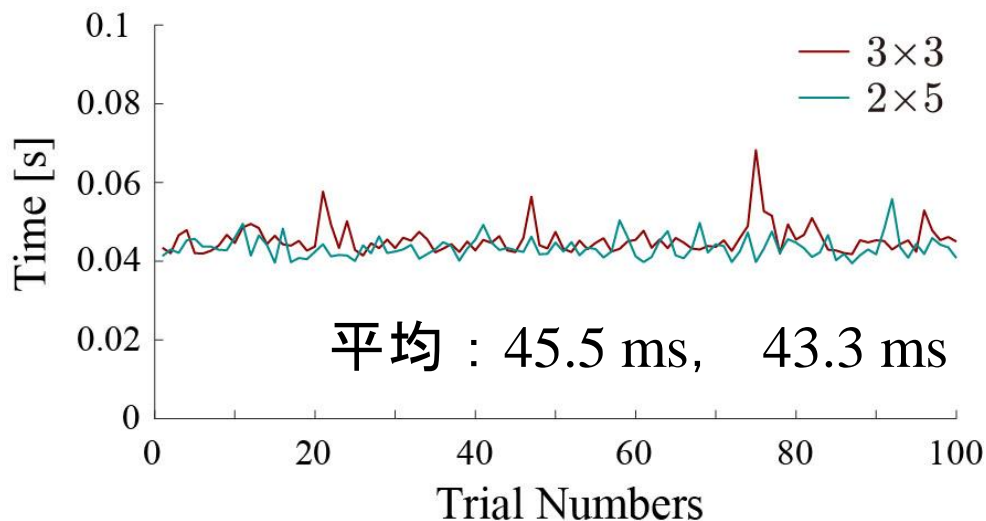
【幾何形状】

u 方向, v 方向に屈曲する
円柱, 球, カテナイド

【半径】

最大 : 10^6 最小 : 1

計算にかかる時間



幾何形状と半径を

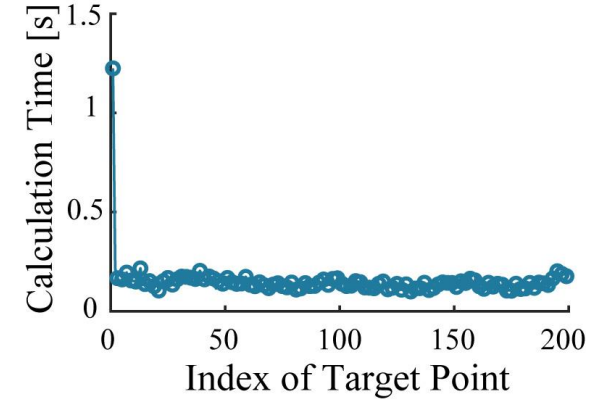
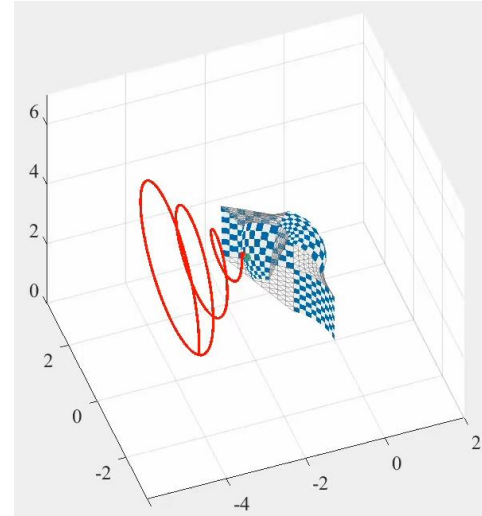
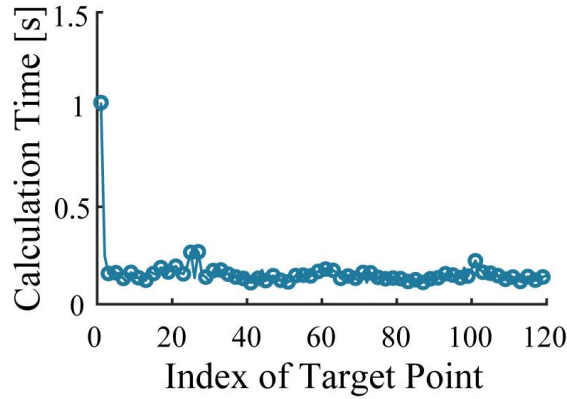
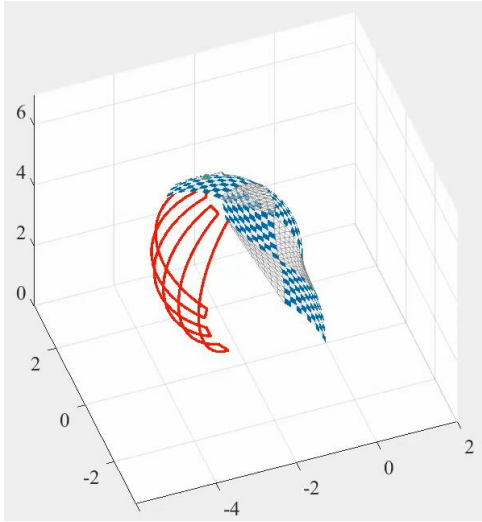
ランダムに100パターン生成

可積分条件を満たす変数で
動標構を積分する場合
(一般的に1秒以上)

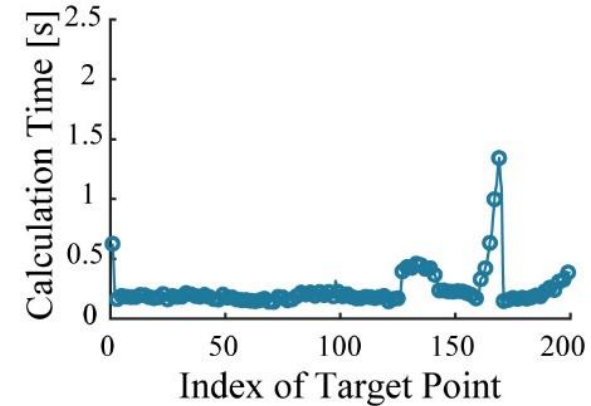
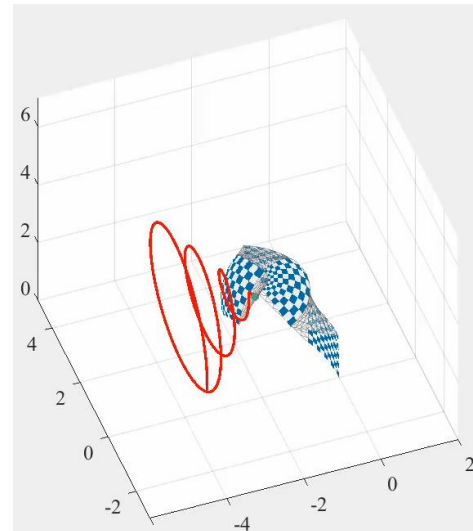
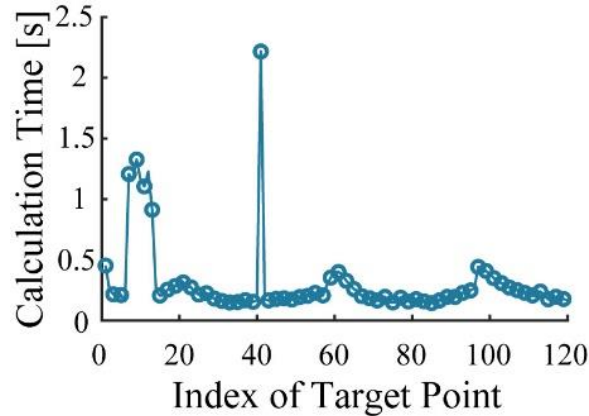
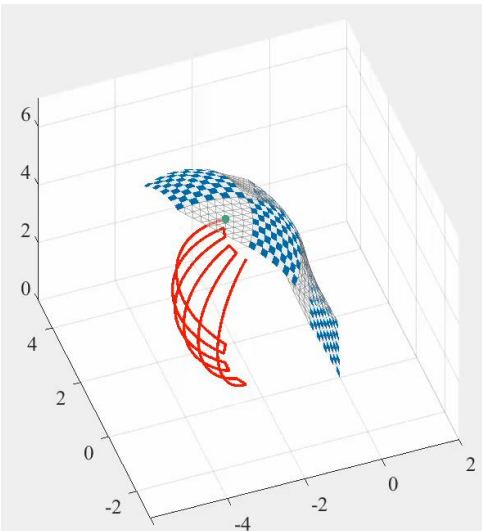
よりも短時間で計算可能

逆運動学

能動要素上の点を制御点とする場合



受動要素上の点を制御点とする場合



想定される用途と企業への期待

下記の項目に興味のある企業との共同研究を希望

- ◇ 個人に合わせて形をデザインする
 表面上に曲面を有する製品（建築物を含む）の開発
- ◇ 表面上に曲面を有する製品の形の評価
 （形を変化させることで、形の良し悪しを評価）
- ◇ 形の情報を格納・参照する次世代デバイス
- ◇ 形を転送する通信技術
- ◇ 腹腔鏡手術における術野情報を取得するロボット

本技術に関する知的財産権①

- ◇ 発明の名称 : 区分的に平均曲率一定な曲面形状ロボット
- ◇ 出願番号 : PCT/JP2022/022043
- ◇ 出願人 : 信州大学
- ◇ 発明者 : 岩本憲泰

本技術に関する知的財産権②

- ◇ 発明の名称 : 術野空間の情報を取得する能動変形システム
- ◇ 出願番号 : US 63/607,570
- ◇ 出願人 : 信州大学
- ◇ 発明者 : 岩本憲泰

お問い合わせ先

株式会社信州TLO 

The logo for Shinshu TLO features the Japanese characters '信州' (Shinshu) in a small font above the letters 'TLO' in a large, bold, black font. To the right of 'TLO' is a red and white stylized graphic element resembling a flame or a drop.

T E L 0268 – 25 – 5181

F A X 0268 – 25 – 5188

e-mail info@shinshu-tlo.co.jp