

仙台市/仙台市産業振興事業団

ロボット博士の基礎からのメカトロニクスセミナー

第25回

C25/Rev 1.0
(C23/Rev 2.0)

3次元CAD と 3次元加工の基礎 2.0

仙台市地域連携フェロー

熊谷 正 朗

kumagai@mail.tohoku-gakuin.ac.jp

東北学院大学工学部
ロボット開発工学研究室

RDE

今回の目的

○ 3次元メカの設計と試作の手段

◇3次元CADによる設計

- ・ 2次元CADと3次元CAD、3DCADの利点
- ・ 3次元CADでできることの例

◇3次元複雑形状の実体化

- ・ 加工手段 切削と積層
- ・ 3次元プリンタの特性

◇設計試作の実例

- ・ ロボット発進用ゲート機構の試作 他

3次元の設計

○ メカ設計開発は3次元（言うまでも無く）

◇ 長らく一般的だった手法

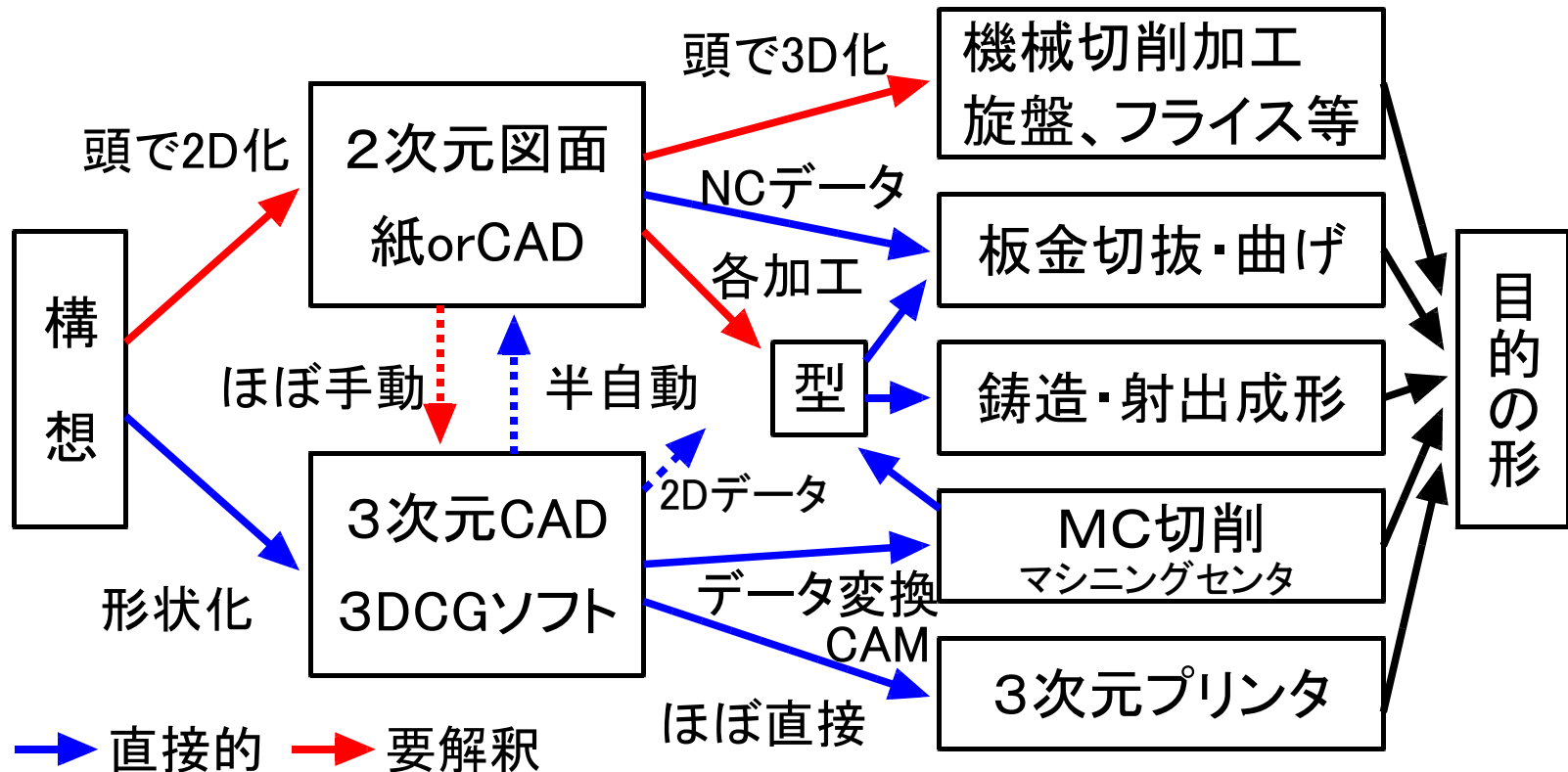
- ・ つくる物は3次元、図面は2次元
- ・ 設計者、製造者の頭のなかで変換
- ・ 表現できるものに限度、読み書きに訓練

◇ 近年一般化してきた手法

- ・ つくる形そのものをコンピュータ内で規定
- ・ そのデータから直接製造工程へ
- ・ 設計自由度大幅にup、直感的にわかる

設計→製造のフロー

○ 構想から最終的なものの形まで



3次元CADを使うことの利点

○ 直接的な設計情報の取り扱い

◇形が直接的

- ・ 3次元表現のままに進む設計
- ・ コンピュータ内で組み立て、動作試験
- ・ 考えに沿った形状の生成
- ・ 機能や見た目を考えながらの寸法調整

◇データが直接的

- ・ 3次元加工手段へのデータ渡し
- ・ 数値データの持つ表現の細かさ

3次元CADを使うことの欠点

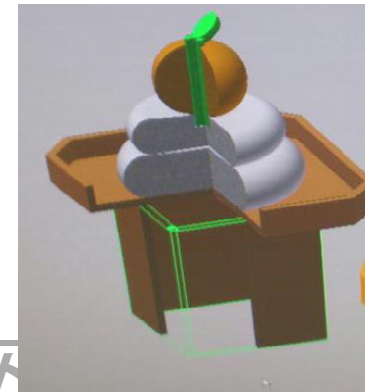
○ 様々な負担とリアルな「絵に描いた餅」

◇導入の負担の重さ

- ・ソフトが**高価**（ものによる：無償～数百万）
- ・活用できるようになるまでの時間(?)
- ・高性能コンピュータ（特にグラフィクス性能）

◇見た目だけが立派になりかねない

- ・**製造と乖離**した形状設計
- ・「えいや」と決断しにくくなる。
- ・形の想像力が低下する？



3次元CADでできること

○ ものになる寸前まで一通り

◇部品の形状設計と空間的チェック

◇部品の組み立て

◇可動部の動作試験

- ・単なる移動/回転、リンクのような相互拘束
- ・カムや摺動のような接触を伴う動作
- ・空間干渉の確認

◇強度計算、慣性数値計算(質量など)

- ・有限要素解析による部材の力や歪み分布

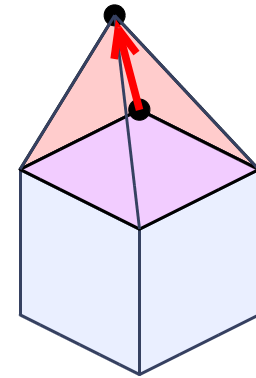
3次元CADでできること：形状

○ CADの二つの傾向

◇直接モデリング系

- 基本形状(球や直方体)を用意して、頂点や面の位置などを変更していく。
 - 3次元CGソフトなどと同じ方向性
 - 感覚的な造形に向く。
 - 機能が限定的な場合あり&無償ものあり。
- 例) Autodesk 123D, Creo Direct Modeling

◇パラメトリック系



3次元CADでできること：形状

○ CADの二つの傾向

◇直接モデリング系

◇パラメトリック系

- ・形状を寸法と拘束によって規定する。

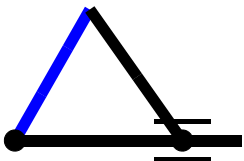
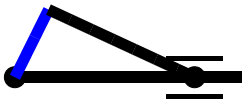
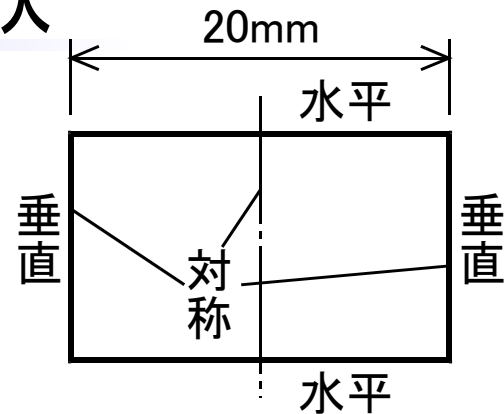
拘束：水平垂直、平行、同長さ、接線など

- ・寸法を変更すると全体が自動変更

- ・機械設計製図に向く。

例) Autodesk Inventor, Fusion 360,

Solidworks, Creo Parametric(旧Pro/E)

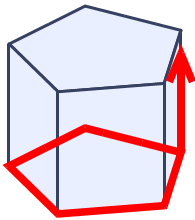


3次元CADでできること：形状

○ 平面形状の規定→立体化

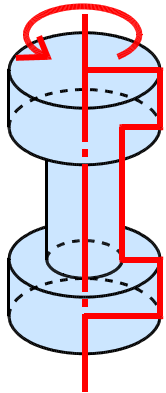
◇平面図の作成

- ・まず平面を決めて、1面の形状をつくる。
- ・基準面：座標面、既存の形状の表面



◇平行掃引、押し出し

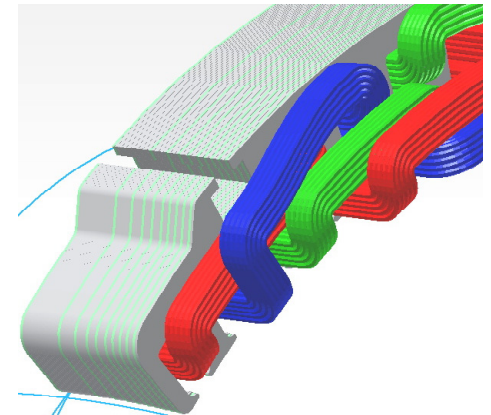
- ・面に垂直な方向に伸ばす。



◇回転掃引、回転体

- ・指定の回転軸周りに回転。

◇他、スイープ、ヘリカルスイープなど

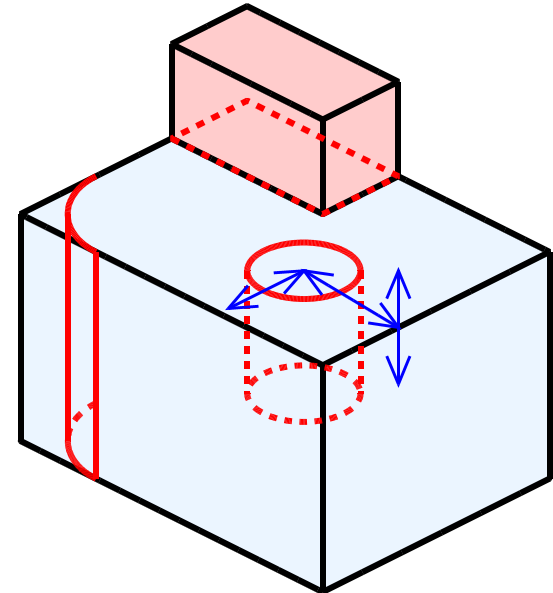


3次元CADでできること：形状

○ 立体形状の連結、除去

- ◇ 本体となる形状
- ◇ 突起などの追加
- ◇ 除去、穴開け
- ◇ 面取り(45度、丸み)
- ◇ ミラー
- ◇ 配列(2方向、回転)

→ **つくりたい形の考え**を積み上げていく
& 寸法については後で調整できる

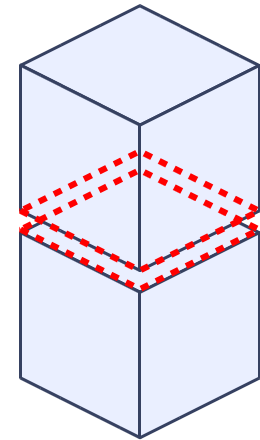
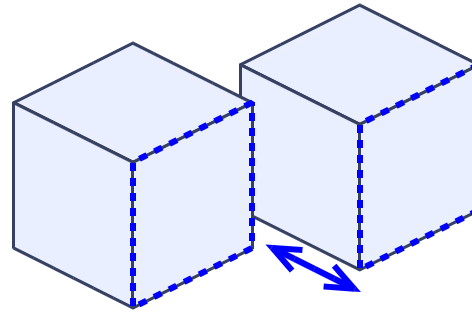
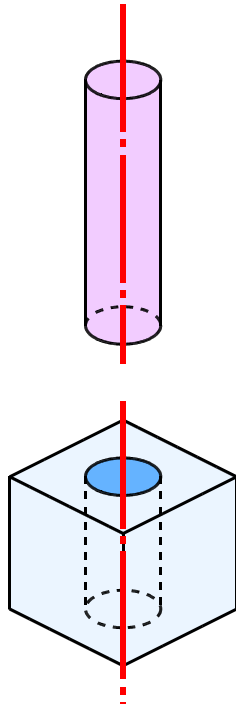


3次元CADでできること：組立（アセンブリ）

○ 実物と同じ発想の連結

◇部品の相互関係を指定＝拘束

- 面と面の密着
- 面と面の位置合わせ
※面と面の距離の指定
- 穴、丸棒の中心軸あわせ



3次元CADでできること：組立（アセンブリ）

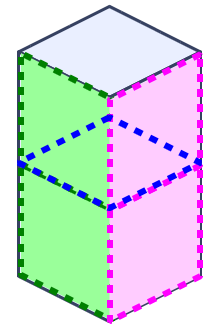
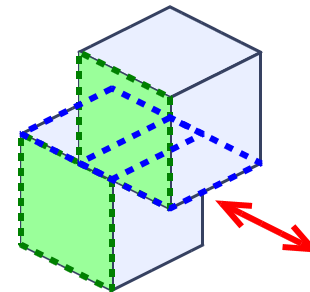
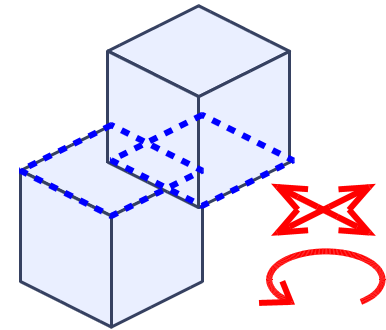
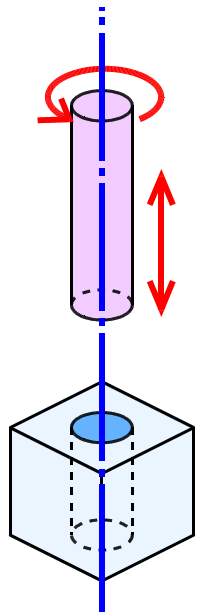
○ 実物と同じ発想の連結

◇ 固定と自由度

- ・ 面と面の拘束
→ 摺る方向に自由
- ・ 2面→直線方向
- ・ 3面→完全に固定

＝物体の運動を表現できる

- ・ シャフトの回転
- ・ 直動機構、各種リンク機構など



3次元CADでできること：運動解析

○ コンピュータ内で組み立てたメカが動く

◇組立後の挙動

- ・ 固定されていないパーツは動かせる。
- ・ 拘束条件には従う。
→適切に組み立てれば連動して動く。

◇動かし方の例

- ・ マウスでドラッグして動かす。
- ・ 特定の拘束条件の距離設定を自動で

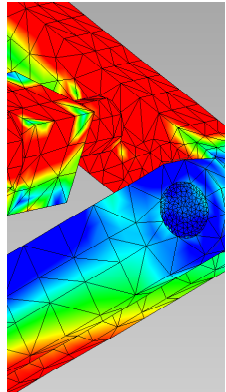
→動画

3次元CADでできること：応力解析（オプション的）

○ 荷重をかけたときの力・ひずみの分布

※応力：面積あたりの力

◇有限要素解析



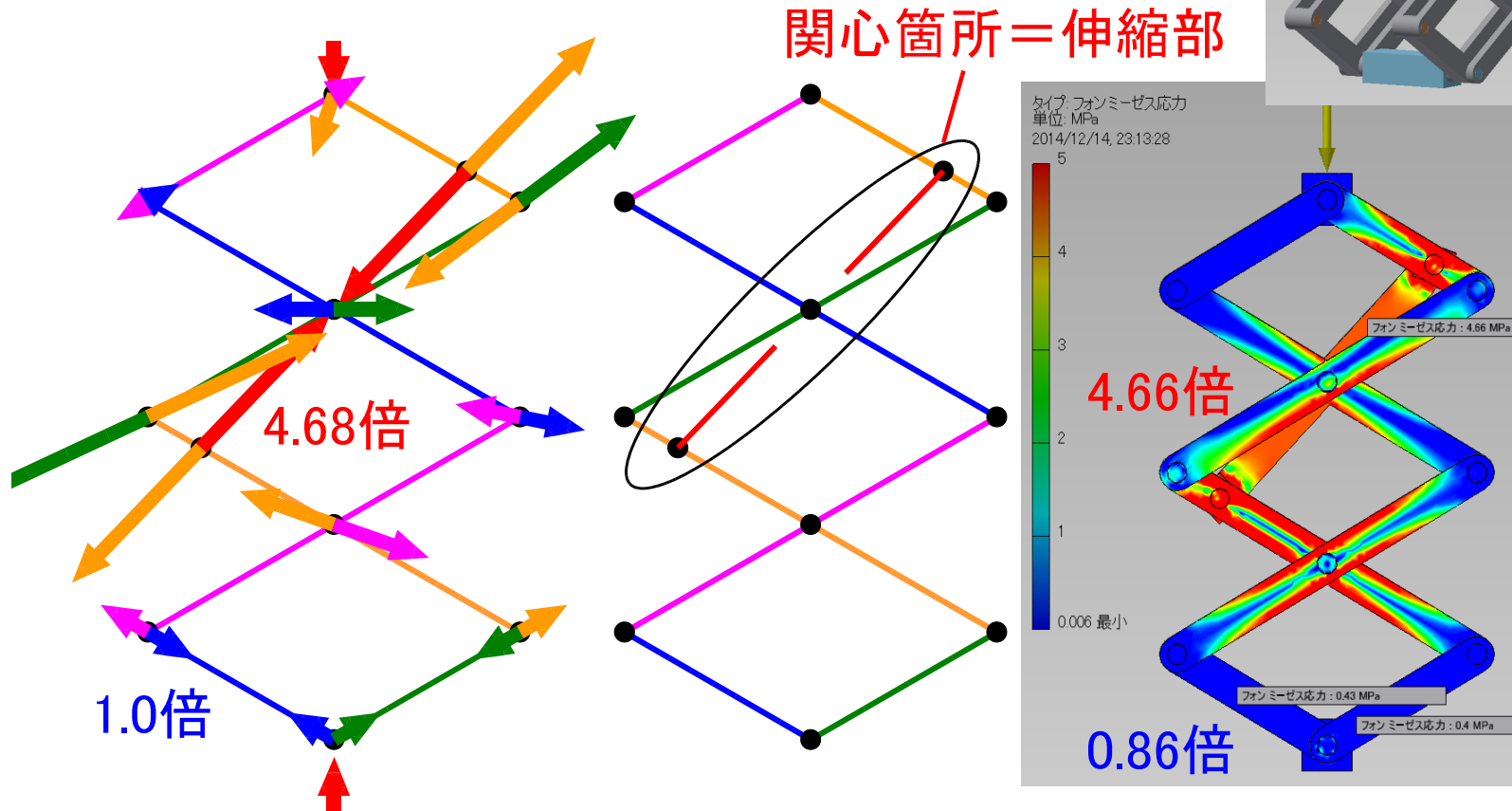
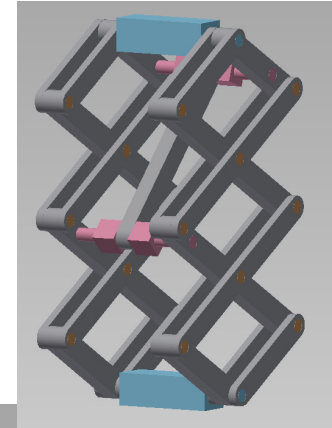
- ・全体を細切れ(メッシュ)にして、各部の力のかかり方を解析する。
- ・局所的な力の分布が見える。

◇使い道

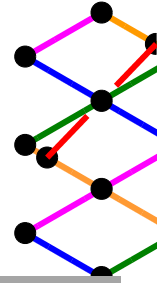
- ・壊れないかどうか、壊れ始めそうな箇所
- ・設計の修正：強化、ぎりぎりまでの削り
- ・荷重計算の検証

3次元CADでできること：応力解析

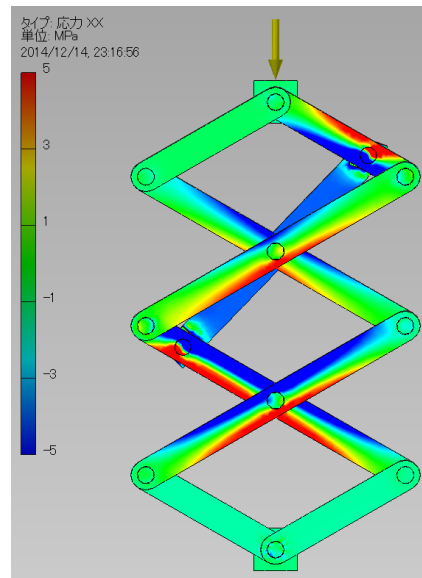
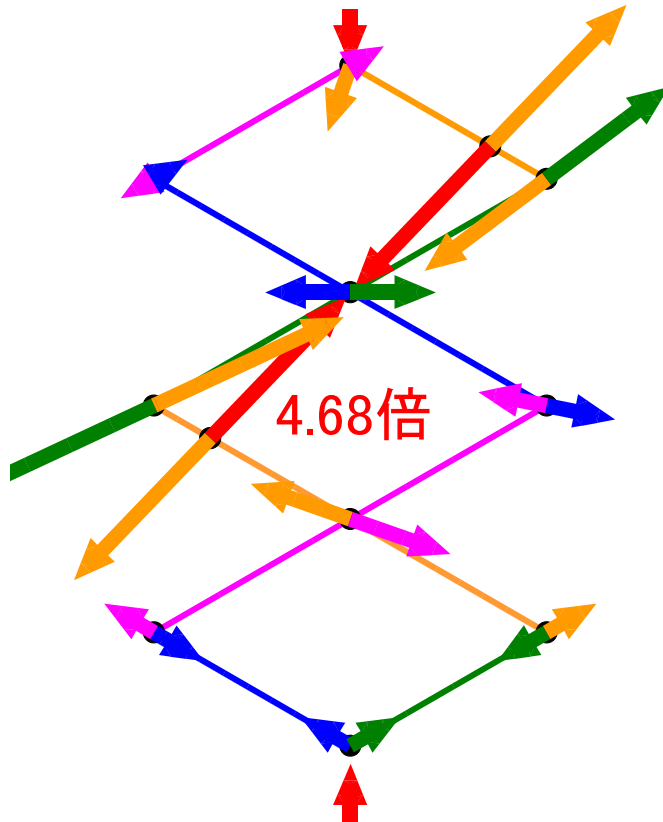
○ 例：ジャッキ機構



3次元CADでできること：応力解析



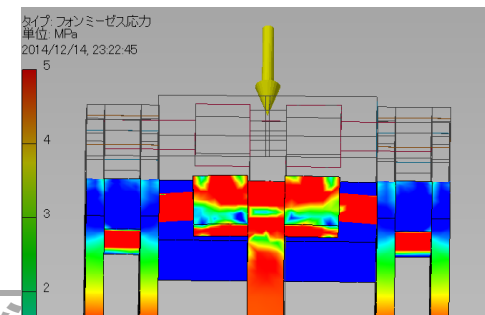
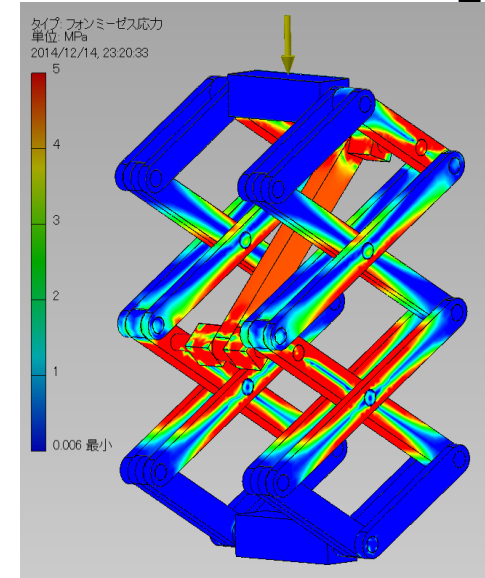
○ 例：ジャッキ機構



水平方向の力

赤：引張

青：圧縮



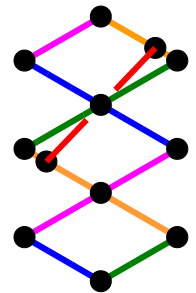
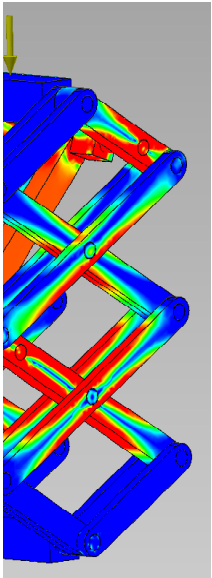
3次元CADでできること：応力解析（オプション的）

○ 荷重をかけたときの力・ひずみの分布

◇使ってみた印象

- ・シンプルなモデルでは、他の計算手法と妥当に整合する。
- ・より詳細であるがゆえに、教科書的手計算手法と食い違うところが多い。
※解析結果が実際に近いはず
- ・情報過多で解釈に時間を要する。

→ 参考にはなるが、固執すると危険な印象



3次元CADの選定

○ デファクト無し、選定根拠多様

◇機能、価格などで系統が多い

※2次元はAutoCADやJw_cadが目立つ

◇用途では選びにくい

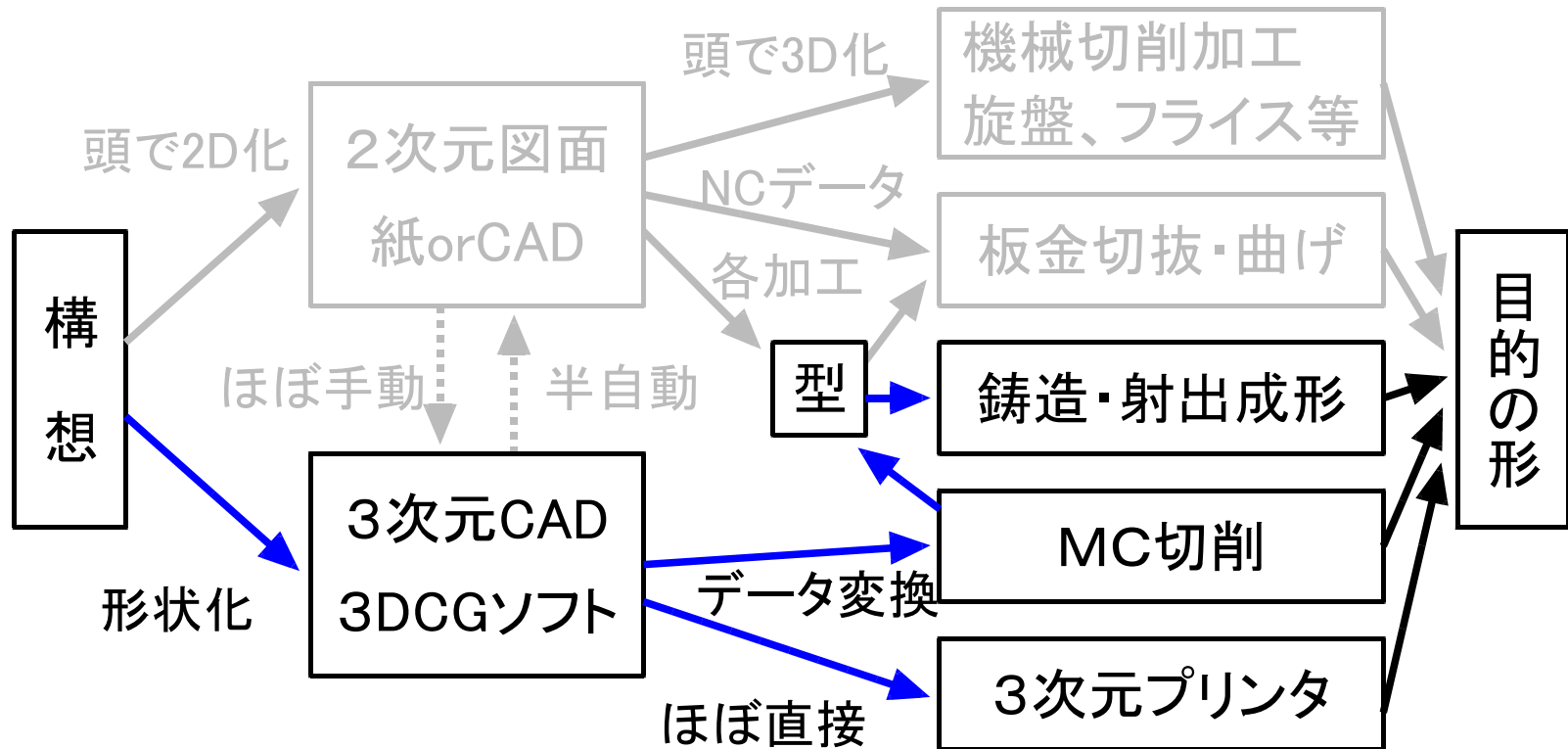
◇選定の根拠の一例

- ・取引先の標準
- ・既存の社内(2D)CADとの互換性
- ・参考情報の多さ（書籍、ネット、人材）

※学校系はアカデミックディスカウント

設計→製造のフロー

○ 設計データから3次元形状の製造



3次元形状実現の手段

○ 主な手段

◇従来型機械加工

◇マシニングセンタ(MC)、NC旋盤による加工

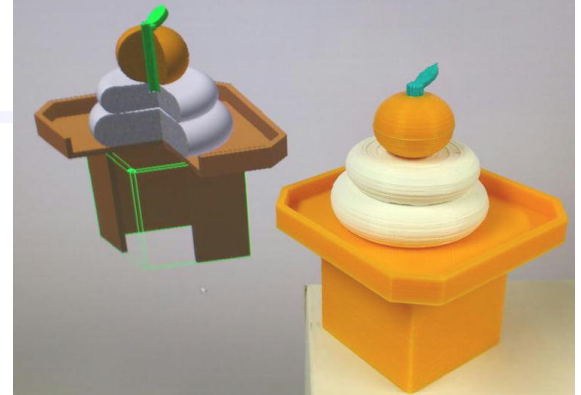
- ・ 工具＋位置と姿勢の自動制御

◇プレス(金型) 鋳造(およびダイキャスト)

◇射出成形

- ・ 型を作って樹脂を加熱加圧流し込み

◇3次元プリント手法



3次元形状実現の手段

○ 特徴比較

◇MC切削加工

○～◎精度 ×～△生産性 △コスト
一品物、金属品製造に向く

◇射出成形

○～△精度 ◎生産性 ×～◎コスト
樹脂の大量生産に向く（少量は不利）

◇3Dプリント

×～○精度 ×生産性 ○～△コスト
手軽な試作、特殊形状の少量に向く

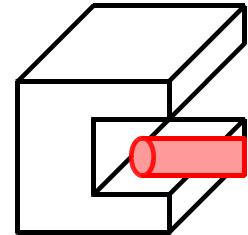
3次元形状実現の手段

○ 特徴比較：形状の制約

◇MC切削加工

除去加工、切削工具の加工経路が必要

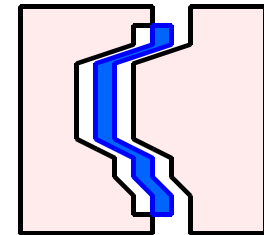
※ある程度内側も掘れる



◇射出成形

金型必須＝初期コスト大

整形後に金型が分離できる形状



◇3Dプリント

形状制約はほとんどない

精度、分解能に方式ごとの限度

成形の手段

○ 射出成形・MC加工

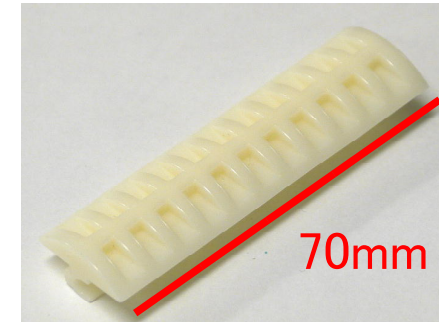
◇基本的に自前は困難

◇県の産業技術総合センターにはある。

・おそらく使い方は学ぶ必要あり

◇外注

・例：プロトラブズ社 <http://www.protolabs.co.jp/>
CADファイル、変換したファイルをWEB送信
→加工の可否の自動判断等
→見積→発注→製品届く（早い＆安い？）



プロトラブズ：
射出成形

成形の手段

○ 3次元プリンタ

◇自前で機械を購入

- ・ ほとほとの精度で良ければ自前も可

◇FabLab SENDAI FLAT で

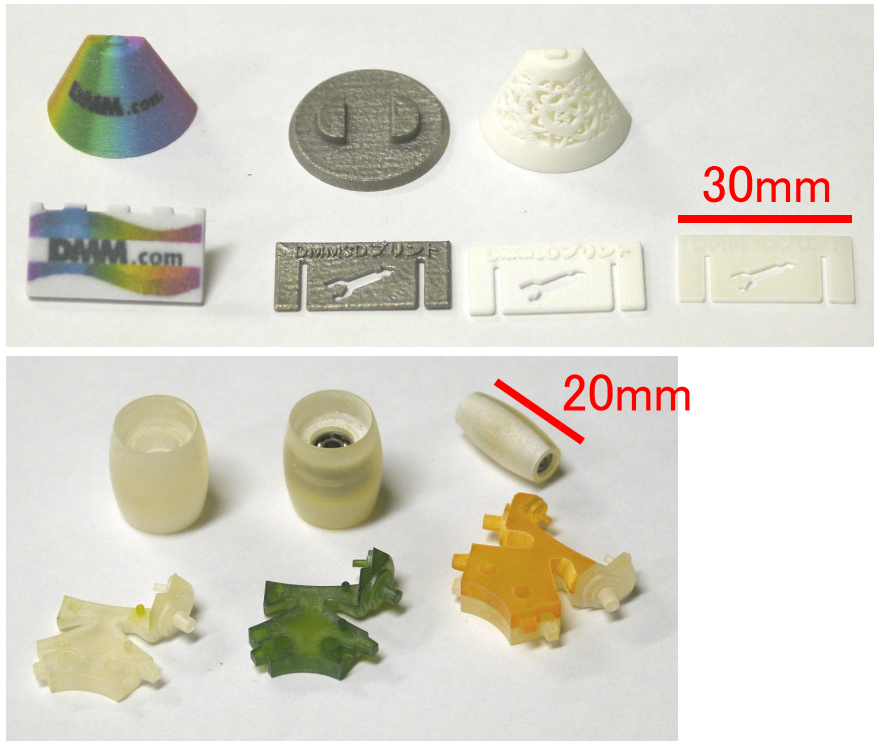
◇外注

- ・ 例 : DMM.make <http://make.dmm.com/>
CADから出力したSTLファイルをWEB送信
→ 見積 → 発注 → 成形品届く
- ・ 機械を導入せずに高級機の出力。

成形の手段

○ 3次元プリンタ

◇DMM.make の成形例



◇サンプルセット(購入)

- ・石膏着色／チタン／
ナイロン／アクリル

◇特殊車輪部品

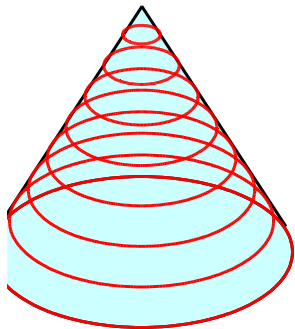
- ・すべてアクリル
- ・誤差0.05mm程度
- ・パチンとはまる
- ・@2～3千円程度

3次元プリンタ

○ 基本的な原理

◇2次元形状の積み重ね

- ・ 3次元CADなどからのデータを水平な薄い層状に分割する。
- ・ 各層を順番に成形し、積層していく。
(下→上が多い、上→下もある)



◇成形手段の方式で大別される

- ・ 熱で樹脂を軟化させて盛りつける
- ・ 紫外線硬化樹脂系
- ・ 粉を固める

3次元プリンタの方式

○ 熱溶解積層法（FDM, 熱融解～）

◇線状の樹脂を加熱して絞り出す方式

- ・ 近年話題になったタイプ、安価、普及
- ・ ABS樹脂、PLA樹脂(ポリ乳酸)
- ・ 本体価格、運用の手間などの面で手軽

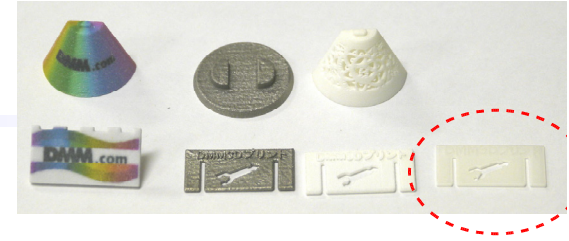
◇特徴

○ 安価（導入コスト数万円～）

△ 精度（分解能、形状精度、収縮、表面荒さ）

△ 強度（+積層面、線間で強度が低下）

3次元プリンタの方式



○ 光造形・インクジェット

◇紫外線で硬化する樹脂を使用

- ・液中に紫外線照射(レーザースキャン)
- ・インクジェット＋紫外線
- ・成形物の仕上がりは綺麗だが機械は高価

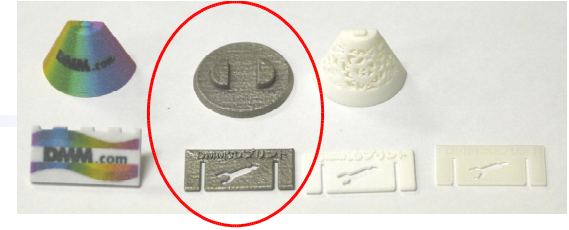
◇特徴

△× 高価(数十万円～数百万円～)

○ 精度(分解能、形状精度、表面荒さ)

△ 強度

3次元プリンタの方式



○ 粉体焼結法

◇材料の粉末にレーザを照射、固化する

- 粉を薄くして、必要箇所を固める
- 樹脂、**金属**
- 実践的な強度が得られる方式。

◇特徴

✗ 高価(数百万円～)

△? 精度(表面荒さ)

◎ 強度(金属)

3次元プリンタの方式



○ 粉末石膏

◇ 粉末の石膏を固めていく

- ・ 石膏に液体を与えて固めていく
- ・ レーザの代わりにインクジェット
- ・ 固化と同時に着色可

◇ 特徴

× 高価（数百万円～）

△ 精度（形状精度、表面荒さ）

× 強度

3次元プリンタ活用の注意点

○ 成形品の特性

◇方式ごとの特性に留意

- ・ 精度、強度、耐久性、コスト
- ・ 材質の本来の特性とは異なる。

◇他の加工手段との違い

- ・ 3Dプリンタで作れるが、**他の手段では不可能**という形状がある。

＝ 3Dプリンタで試作する場合にも、
最終的な手段を想定した設計

3次元プリンタ活用の注意点

○ 導入、運用のコスト 参考比較：基板加工

◇本当に本体を買うかどうか

- ・熱溶解式以外は本体価格が高価で、相当回数使わないと元はとれない。

※外注の方が結果的に安い

- ・手元にあれば最速で試作できる。

◇通常のプリンタと同じ傾向

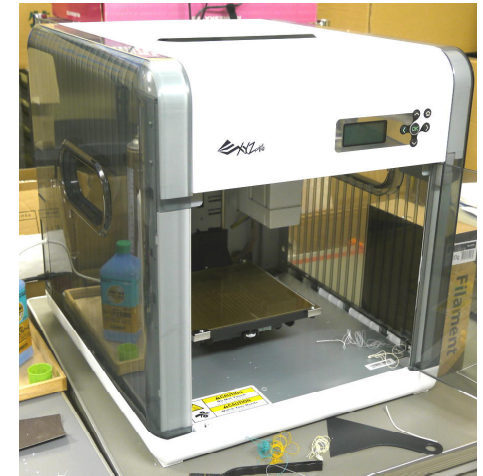
- ・本体価格は機能に比べて抑えめでも専用の素材の値段が高い場合多し。

FDM式3次元プリンタの実際

○ 熱溶解式3Dプリンタを導入してみた

◇導入の経緯

- ・前から気になっていた。
- ・昨年発売のdaVinciが評判：
性能/コストパフォーマンス
- ・部品製作の試み／教育



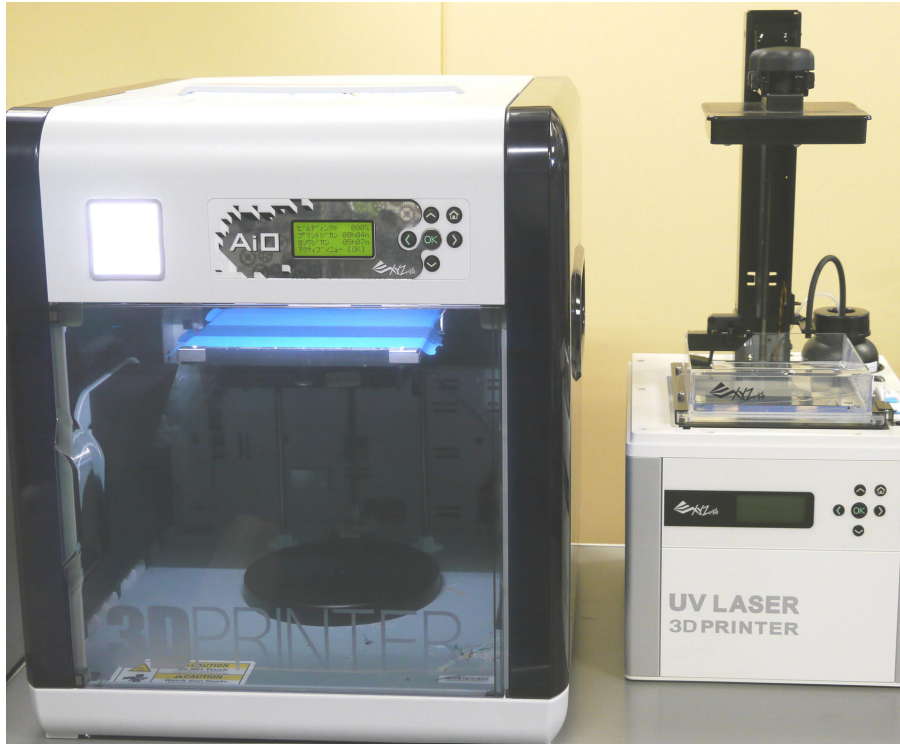
XYZprinting 社
daVinci 1.0

◇導入の結果

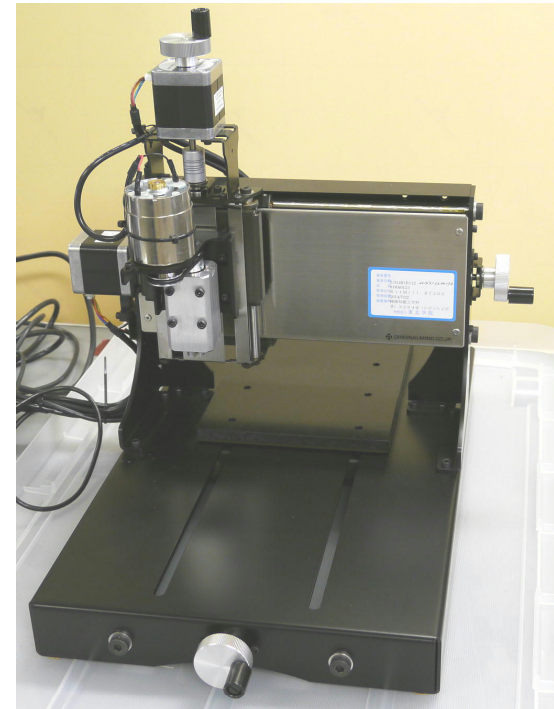
- ・ロボットの設計方針が変わった。
- ・多いときは1週間連日フル稼働。

FDM式3次元プリンタの実際

○ 研究室の3次元加工装置



XYZprinting社 daVinci 1.0×2 Nobel 1.0
(ABS FDM) (レーザースキャン光硬化)



ORIGINALMIND社
KitMill BT200

FDM式3次元プリンタの実際

○ 3Dプリンタのスペックと条件

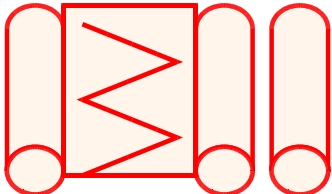
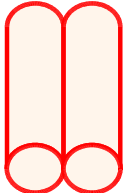
◇全般

- ・ 分解能で書かれることが多い(特に積層幅)
例) 層0.1mm 層25um 位置決 0.0??mm



◇熱溶解式

- ・ ノズル径: 樹脂を絞り出す線幅
= 水平方向の最小の大きさ
≠ 水平方向の位置分解能



幅(大)自由

最小幅

↑
間隔は自由(位置分解能)

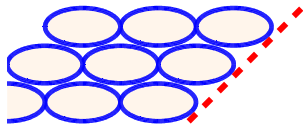
※0.4mmが多い

FDM式3次元プリンタの実際

○ 成形の制約

◇基本的には、上に積んでいく

- ・ **下が抜けている場合**に制約



幅0.4mm
層0.2mm
重なり50%

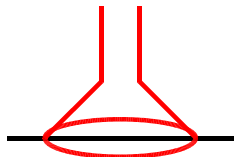
- ・ 斜め**45度**程度ならオーバーハング可
→ 形状の自由度、ザグリ穴を下にできる

- ・ $\phi 4$ 位の**横穴**もまあまあ可

※積層条件による<本機0.2mm以下の場合

- ・ **サポート**を入れれば完全な浮きも可

→ サポートの除去が面倒: 避けたい



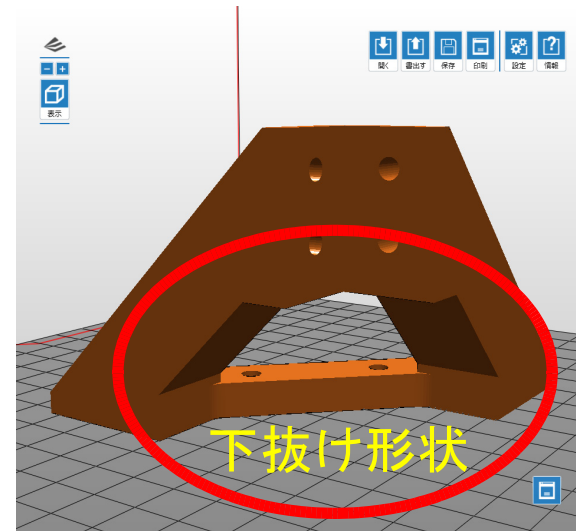
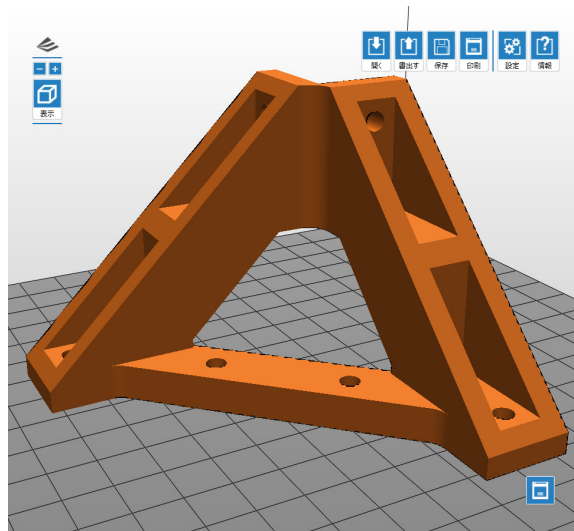
頂角90度

FDM式3次元プリンタの実際

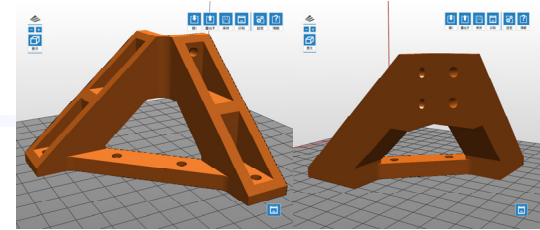
○ 加工変換の例

◇プリンタ付属のソフトでSTLファイルから変換

- ・プリンタによってはオープンソースソフト
- ・STLファイル：形状のやりとりに一般的



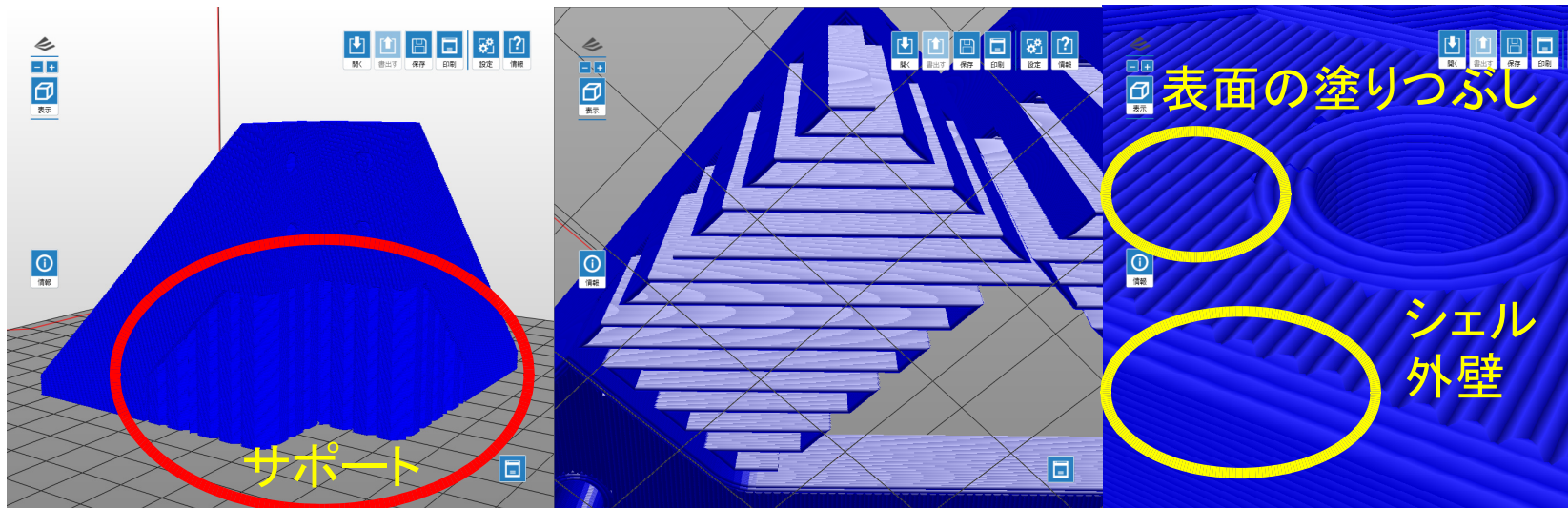
FDM式3次元プリンタの実際



○ 加工変換の例

◇プリンタ付属のソフトでSTLファイルから変換

- ・形状を線材の集合に変換
- ・サポート部分の生成



FDM式3次元プリンタの実際

○ 性能評価

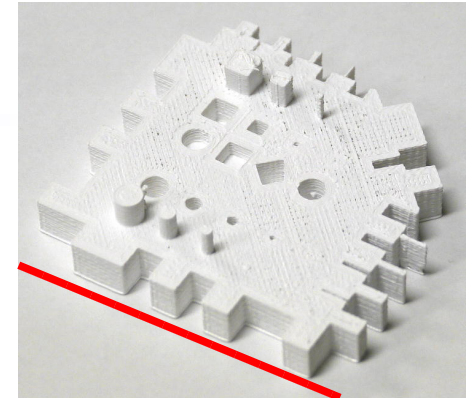
◇ 三つの形状誤差

- ・ 全体的に僅かに小さくなる: 冷却収縮
& 部分的に反りやすい

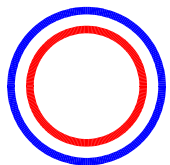
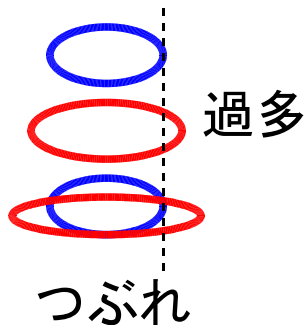
- ・ 外周のはみ出し: 0.1mm程大

- ・ 小さな環構造(穴、突起)は収縮しやすい:
直径で0.3~0.4mm程度

→ 寸法精度が欲しいときは要補正or追加工



60mm



リング収縮

今回の目的

○ 3次元メカの設計と試作の手段

◇ 3次元CADによる設計

- ・ 2次元CADと3次元CAD、3DCADの利点
- ・ 3次元CADでできることの例

◇ 3次元複雑形状の実体化

- ・ 加工手段 切削と積層
- ・ 3次元プリンタの特性

◇ 設計試作の実例

- ・ ロボット発進用ゲート機構の試作 他

3次元CADとプリンタの作例

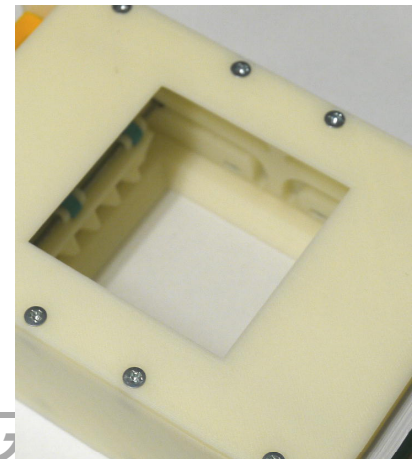
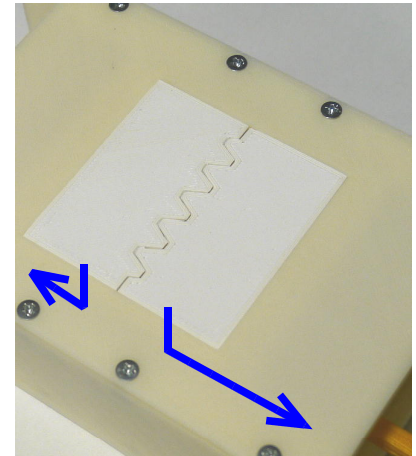
○ ロボットの発進ゲート機構を試作したい

◇イメージ

- ・ 道路にゲートがあって、スライドして開いて、ロボットがせり上がって来る。

◇想定仕様

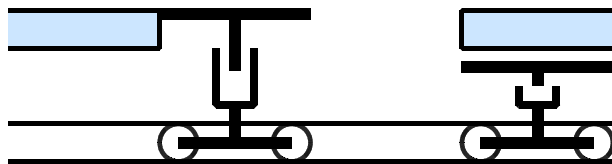
- ・ 普段は大荷重に耐えられる。
- ・ 沈んでからスライドする。
- ・ 開口部を完全に確保できる。



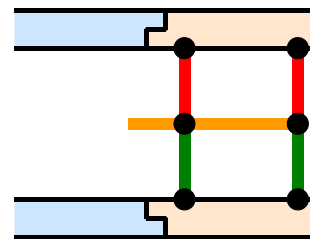
3次元CADとプリンタの作例

○ 機構の検討

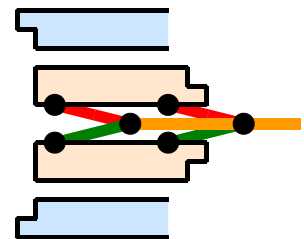
- ・ 普段は大荷重に耐えられる。
- ・ 沈んでからスライド。



- ・ 直動系 × 2 / 片側
- ・ レール部への負担
- ・ 奥行き方向の支え



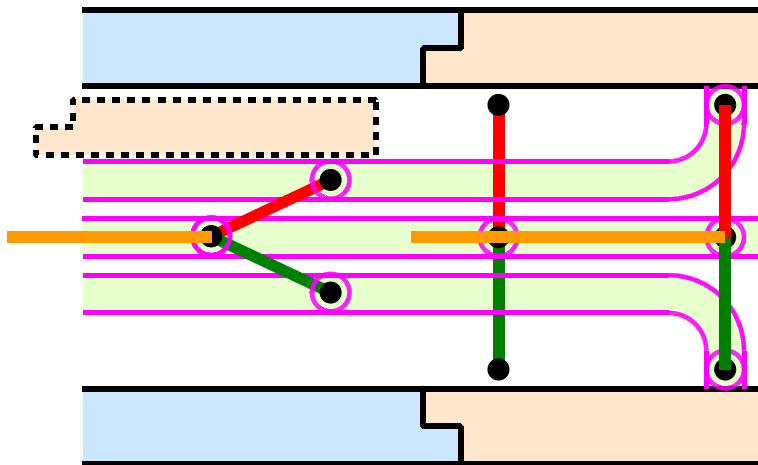
- ・ 平行リンク × 2 (直動 × 1)
- ・ 普段はリンクの死点で強い
- ・ 荷重は下蓋、防御性も良い？



3次元CADとプリンタの作例

○ 機構の検討

- ・ 普段は大荷重に耐えられる。
- ・ 沈んでからスライド。



- ・ 橙：スライド牽引リンク
- 赤、緑：ゲート板支持リンク
- ・ 紫：ガイド溝＋ローラフォロワ
- ・ 牽引リンクをひく
 - 支持リンクが傾く
 - ゲート側端のフォロワが溝に沿って降りて、引き込み

※ガイド溝、フォロワには支持荷重なし

3次元CADとプリンタの作例

○ 機構案→実体化

↓ 15年ほど前

◇という案を考えたが**実現手段がなかった**

- ・スライドの溝をどう作るか？

- 基板加工機を流用しようと材料買って放置

◇3次元CADでアイデアの検証

- ・6年前に初めて3DCADを触ったときに、

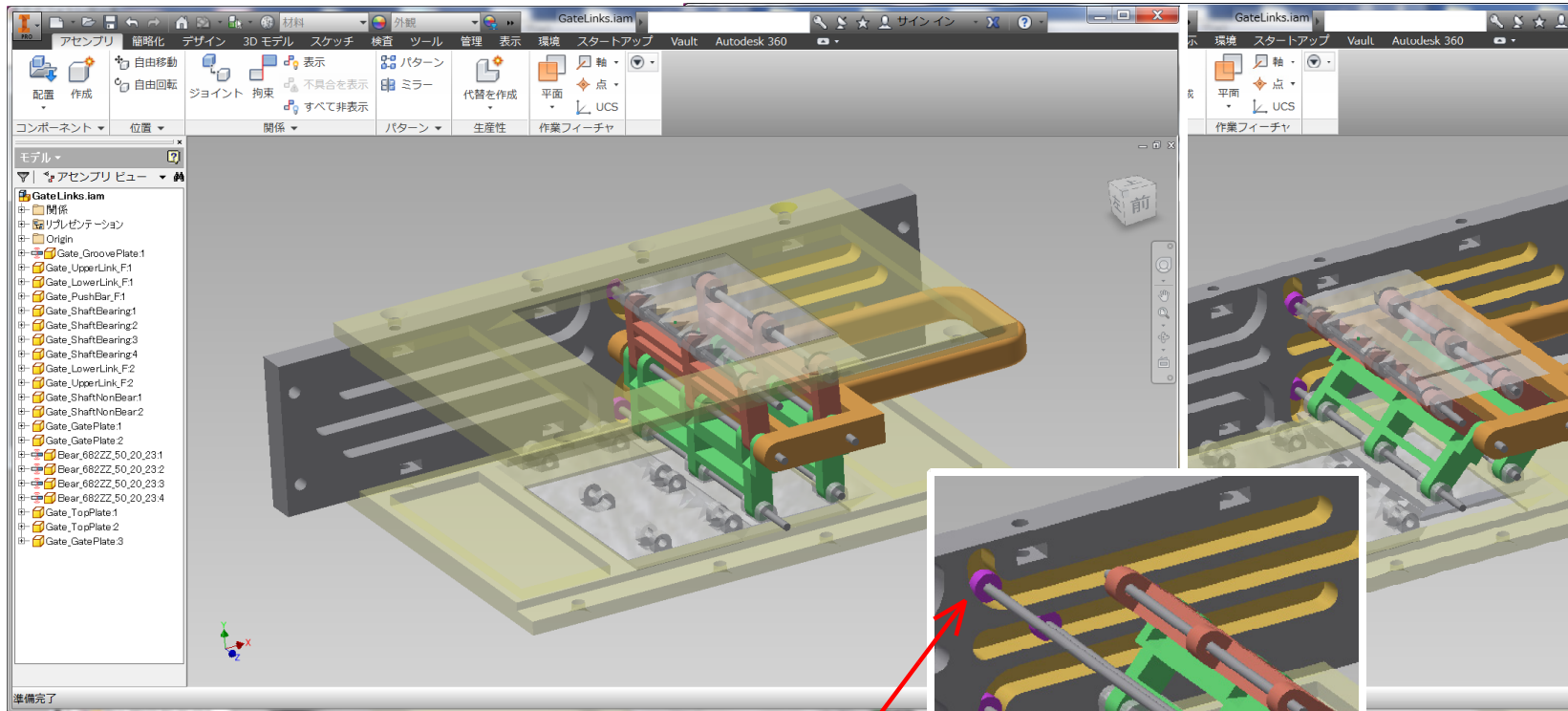
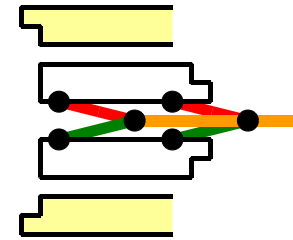
機構シミュレーションの題材にはしていた

- 実体化せずに放置。レーザー加工機使う？

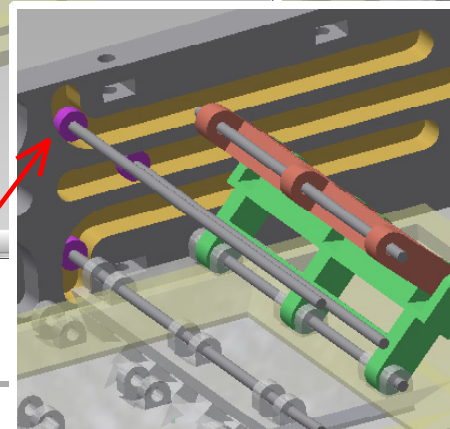
◇そうだ、3次元プリンタで作れそう！

3次元CADとプリンタの作例

○ 3次元CADモデリング (1日弱)

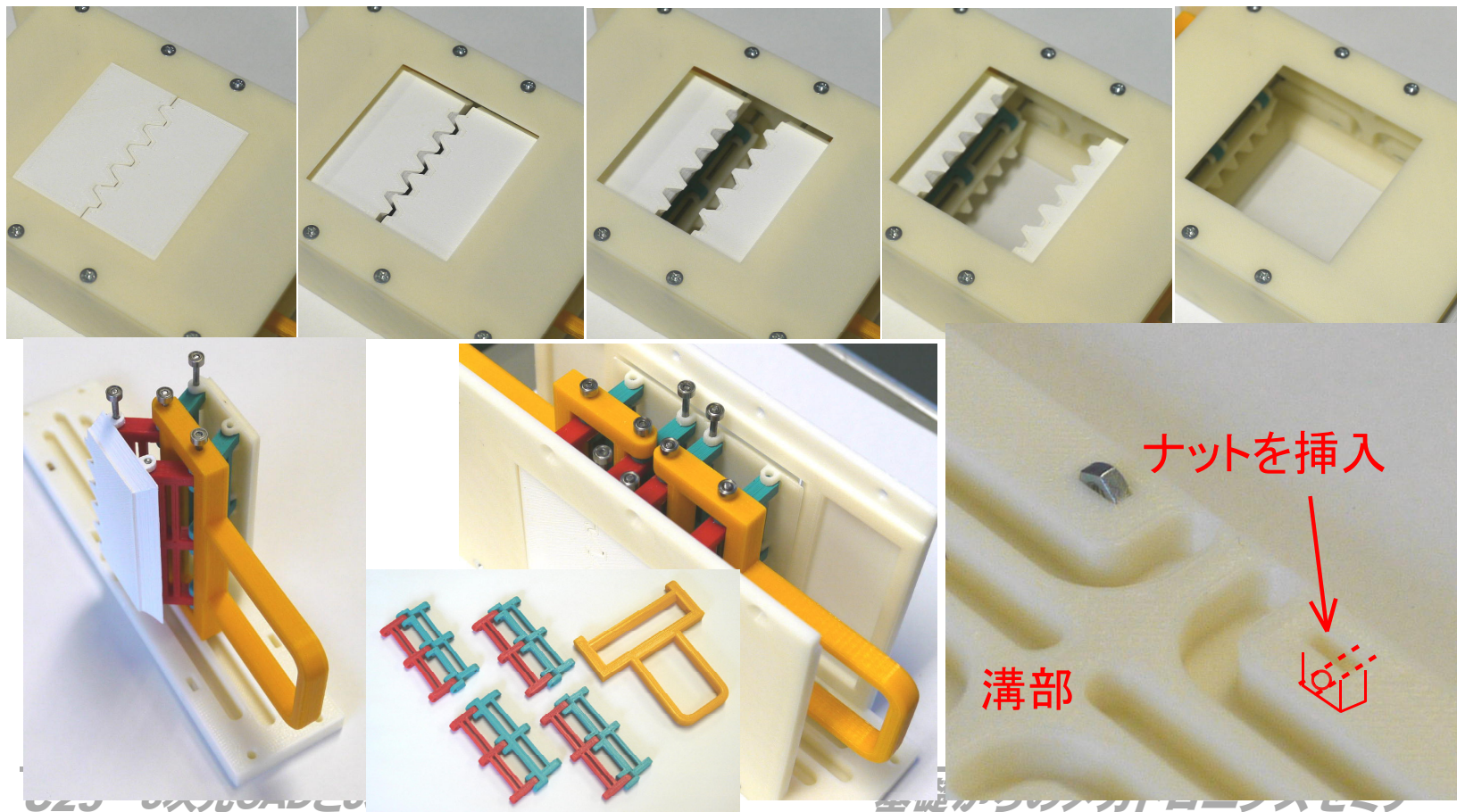
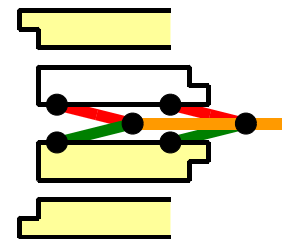


フォロワ用ベアリング
※「接触セット」でガイド動作



3次元CADとプリンタの作例

○ 成形、組み立て例（約3日）

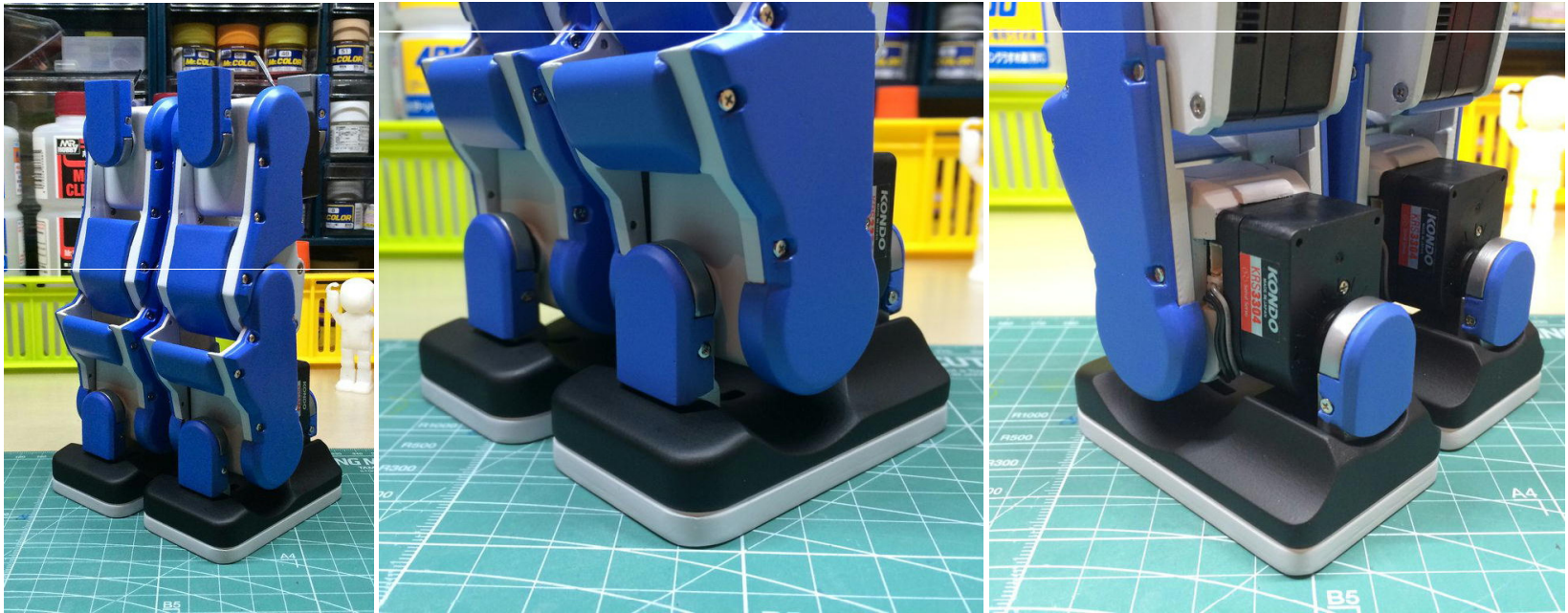


3次元CADとプリンタの作例

○3次元プリンタ＋追加工（平滑化＋塗装）

◇Koichi Yoshimura 氏作 人型ロボット脚部

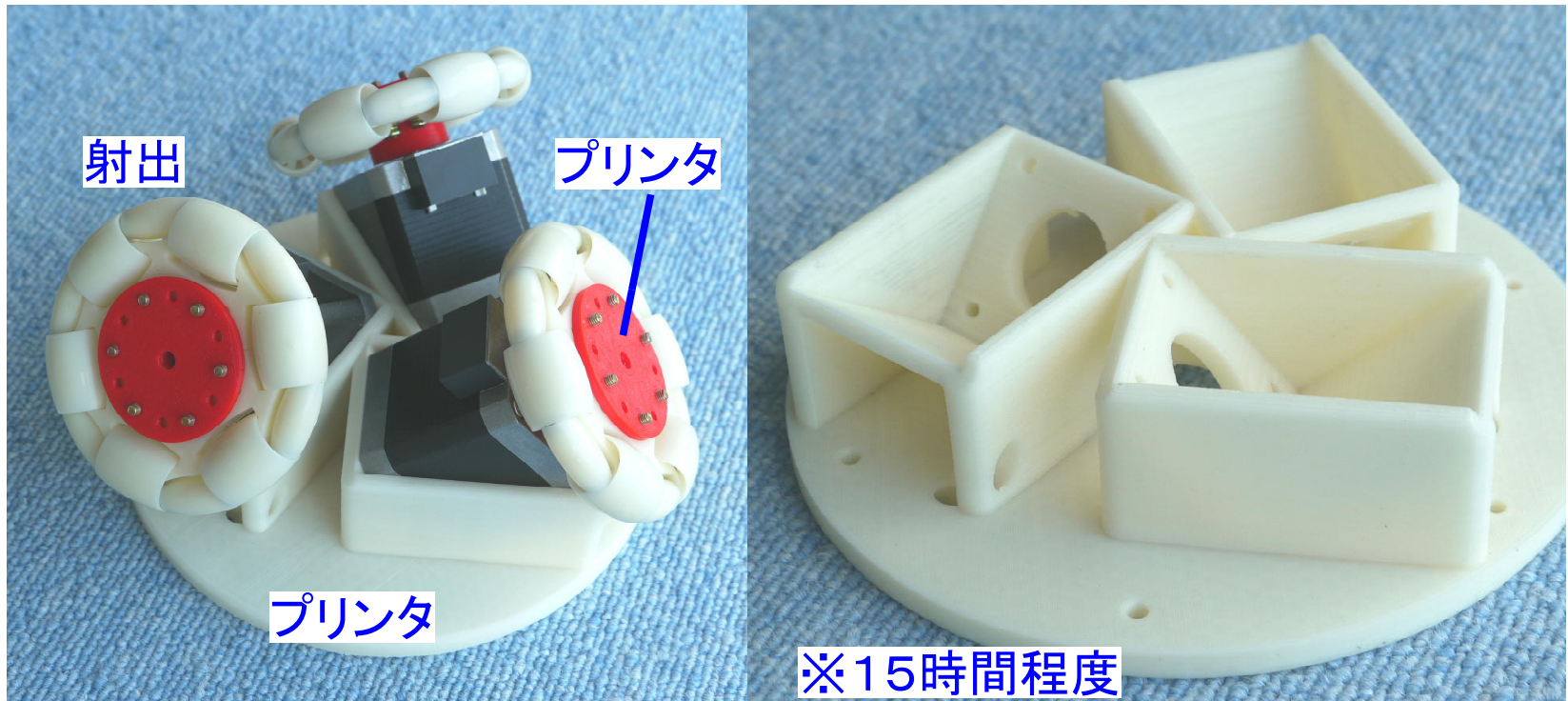
※ご許可を頂いて引用



3次元CADとプリンタの作例

○射出成形＋3次元プリンタ

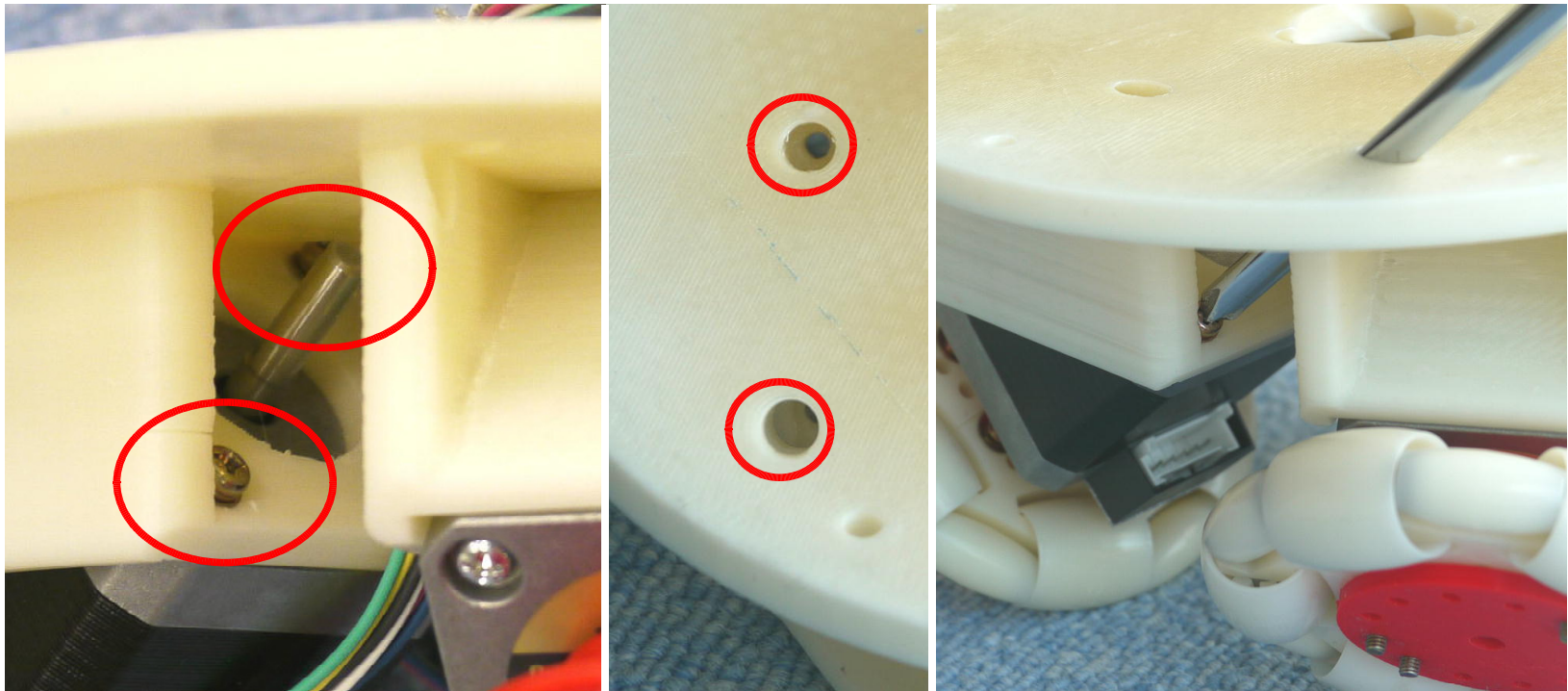
◇全方向移動輪による球体駆動機構



3次元CADとプリンタの作例

○射出成形＋3次元プリンタ

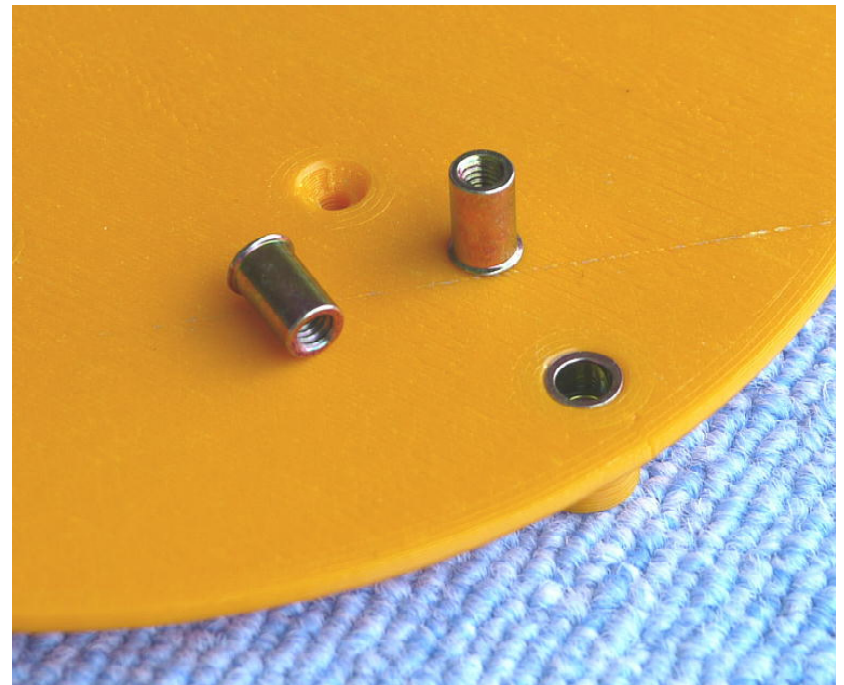
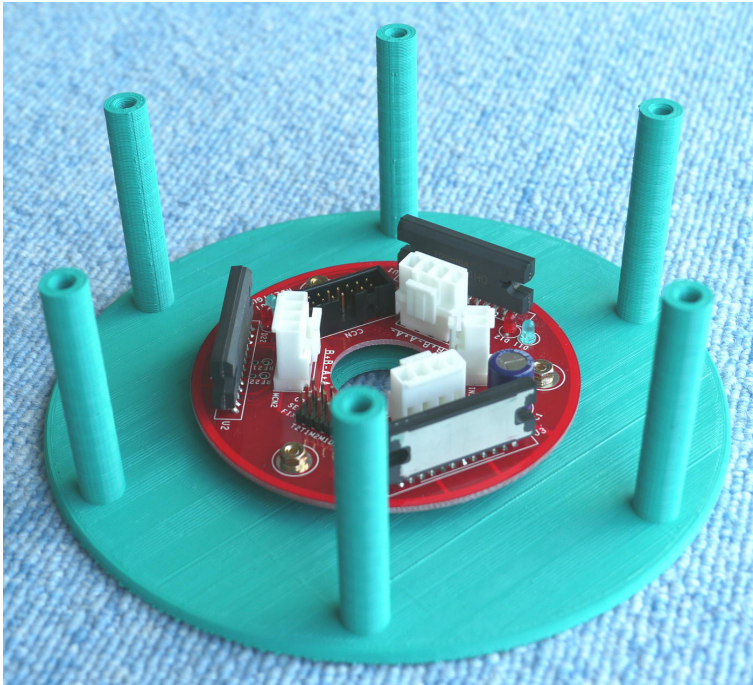
◇全方向移動輪による球体駆動機構



3次元CADとプリンタの作例

○射出成形＋3次元プリンタ

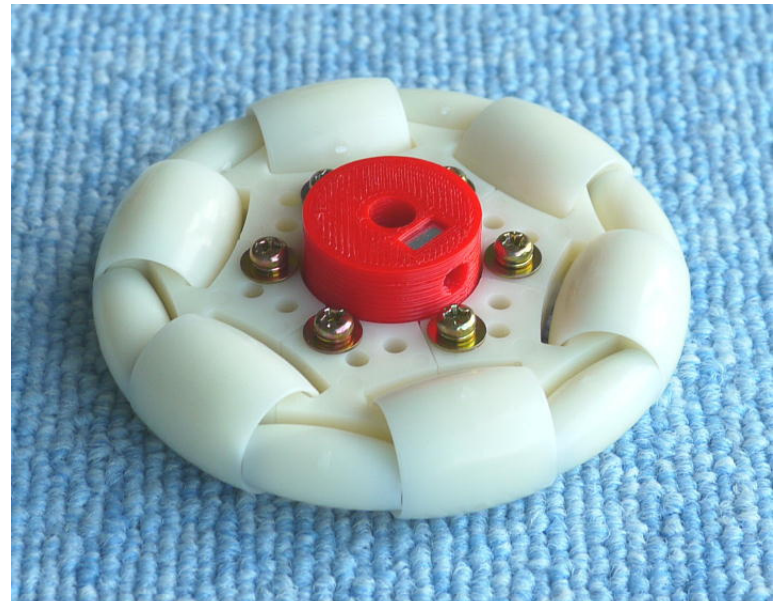
◇全方向移動輪による球体駆動機構



3次元CADとプリンタの作例

○射出成形＋3次元プリンタ

◇全方向移動輪による球体駆動機構



3次元CADとプリンタを導入しての変化

○ 設計面

◇部品の設計基準が変わった

- ・ 切削→レーザー(板主体)→プリンタ
- ・ 強度が必要→従来通り
- ・ 強度があまり要らない場合：

従来との互換性を無視した設計

※プリンタでなければ作れない形

◇3DCADの積極活用

- ・ 従来型もまずは3D設計(加工可能性に注意)

3次元CADとプリンタを導入しての変化

○ 教育（学生さん系）面

◇卒業研究に標準導入

- ・「強度度外視でまずはアイデアを形に」
- ・2次元製図に比べてチェックしやすい
- ・2次元CADより修得早い印象
- ・検討→試作→改良 が数段早くなった

※両刃の剣

◇不安点

- ・「機械科」としての設計教育とのずれ

まとめ

○ 3次元の設計

- ・ 3次元のメカに3次元の設計。
- ・ 図が3次元になる以上に強力：
 - ・ 組立や動きの確認
 - ・ コンピュータの中で切り貼り
 - ・ 運動、力、ひずみのシミュレーション
- ・ 便利なのは確かだが、一抹の不安も。
よく考えること、判断感覚の低下まねく？
- ・ 導入コストは要確認。

まとめ

○ 3次元の加工手段

- ・ 3次元CADのデータをそのまま使う

加工手段がいくつも存在：

マシニングセンタ(MC)、射出成形

3次元プリンタなど

- ・ それぞれ向き不向きがかなり異なる。
- ・ 3次元プリンタは量産性以外は非常に便利で、即効性あり。ただし、いきなり買わずに、借りる／外注も現実的な選択肢。