

標準課題「六足歩行ロボット」改善提案による製作の取り組み

岩城勇生^{*1}, 浜田 真^{*1}, 舛田光一郎^{*2}, 山下 忠^{*3}

本課題は、応用課程 1 年次で行う標準課題において、設計、部品の機械加工、メカニズムの組立、調整、駆動基板の製作、制御プログラムの開発等の実践を通して、メカトロニクス機器に対する基本的ものづくり能力の修得を目的としたものである。今回、前年の「六足歩行ロボット」を参考に改善点を考えた装置を設計することにより、ロボットの一部ではあるが構想を行うという要素を取り入れ、次年度の構想から行う開発課題につなげることができるように取り組んだ標準課題について報告する。

Keywords : X-Y テーブル機構、リンク脚、自立型移動装置、グループワーク、改善。

1. 緒言

本課題は機器の設計、部品の機械加工、メカニズムの組立、調整、駆動基板の製作、制御プログラムの開発等の実践を通して、メカトロニクス機器に対する基本的ものづくり能力の修得を目的としたものである。

H27 年度は、前年製作した「六足歩行ロボット」を参考に改善点を考えた装置を設計することにより、ロボットの一部ではあるが構想を行うという要素を取り入れ、構想から設計する考え方を理解するという点に取り組むことにした。

1.1 課題の概要 本課題は平行リンク機構を利用した 3 本の脚と、XY テーブルと一体化した 3 本の脚を交互に移動し、全方向移動を可能にした歩行型移動機構である。本課題の特徴として、X 軸・Y 軸を歯付きベルトによるテーブル駆動機構、Z 軸をネジおよび平行リンク機構で構成し、各軸あたり 1 個のモータで駆動している。

1.2 課題の構成 本課題は①2 枚の アルミ円盤、およびそれらに挟まれて配置された XY テーブルからなる本体、②XY テーブル上に正三角形の各頂点に配置・固定された 3 本の固定脚(以後固定脚と呼ぶ)、および下部円盤に同様に配置されたリンク機構を用い、上下動が可能な 3 本のリンク脚(以後リンク脚と呼ぶ)からなる脚部、③上部円盤に配置された PLC、およびモータドライバ回路からなる制御部の、3 つの部分から構成された自立型移動装置である。図 1 に装置外観を示す。

1.3 課題の構造 教材の大きさについて大人一人が楽に持ち運べる大きさ、重さが望ましい。検討の結果、目安としての大きさを W500mm×D500mm×H500mm、重量を 49N とし各部の設計を行った。

本体の外郭は図 2 に示すように、軽量化および部品点数の削減を考え、直径 270mm 厚さ 5mm のアルミ合金(材質 A5052)円盤 2 枚の間を、Z 軸直動案内を兼ねた φ5 鋼棒より製作した、6 本の支柱で支えるシンプルな構造とした。この構造を採用するにあたり、特に注意

する点として、

①円盤の各寸法が各機構の取付け基準となり、特に移動ねじと支柱間の取付穴相対寸法、および各 Z 軸移動ねじ間の相対寸法に精度を必要とする。

②組立時に上下の円盤がねじりの位置にならないよう工夫する。

の 2 点があるが、今回①に対しては、加工基準の位置決めを何度でも正確・簡便に行えるよう図 3 に示す治具を製作し、マシニングセンタ(以後 MC)で同時一体加工する事によって解決を図った。また②に対しては、支柱の倒れを極力防ぐため両端を段付き形状とし、か



図 1 装置構成

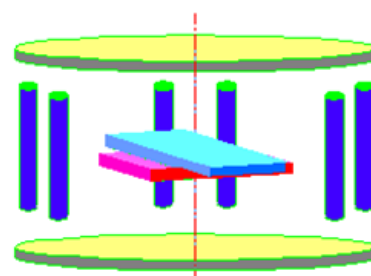


図 2 本体外郭

^{*1} 生産機械システム技術科

^{*2} 生産機械システム技術科

(現 京都職業能力開発促進センター)

^{*3} 生産機械システム技術科

(関東職業能力開発大学校)

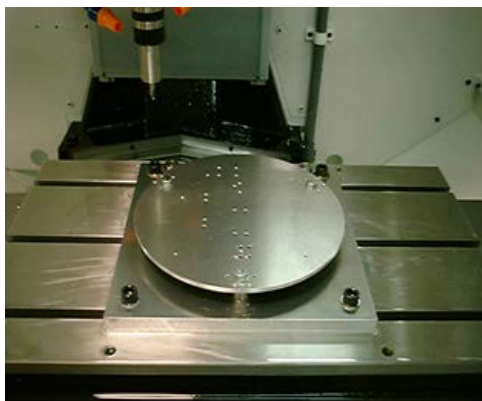


図3 円盤加工治具の外観

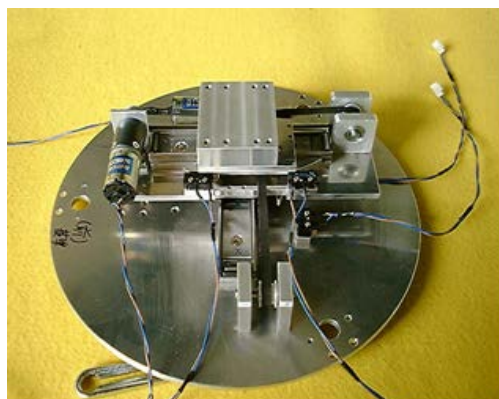


図4 X Yテーブル外観

つ段付き間寸法（上下円盤寸法 80mm）の公差を厳しくすることによって、組立・調整時の修正をなるべく発生させない方針で、部品設計及び加工方法の検討を行った。

XY テーブルは上下のアルミ円盤に挟まれるかたちで、市販の一軸テーブル（スライドバックを直交に重ね合わせ、図4に示すように下部円盤中央に配置・固定されている。テーブルの駆動部はモータ、プーリ、歯付きベルトで構成され、軽量コンパクトにまとめられている。テーブルストロークは X・Y 方向とも 40mm で、移動速度は約 90mm/s とし、歯付きベルトの使用、転がり接触のテーブルおよび適度なモータの選定により、比較的精度のよい高速移動を可能にしている。収納効率を上げるため、高さ寸法を最小にする必要があり、テーブル駆動用ベルトの固定において、個々のテーブルの取り付け板に溝を設け、その溝で挟み込む方法をとっている。また、個々のプレートの積み重ねにおいて座ぐりを行い、ねじ頭部の干渉を逃がすことでコンパクト化を図っている。

テーブル上部に後述する固定脚台が取り付けられ、できるだけテーブルストロークを稼げるよう、固定脚台の形状、向き等の最適化を行っている。テーブルストロークを決めるリミットスイッチ用ドッグは、あたりと範囲が調整できるように長穴で固定されている。

1.3.1 脚部 脚部を構成する固定脚の構造を図5、図6に、リンク脚の構造を図7、図8に示す固定脚は軽量化を図るため、脚本体に断面形状 W20mm × H15mm × t1.5mm のアルミ中空角パイプを用いている。さらに、リンク脚も同様であるが、足首の関節に当たる部分に

スイベルスクリーを用い接地時の安定化を図っている。また、脚固定板に明けられた四角穴は、設計段階より制御部の配置、配線を考慮し、事前に空けられた配線の通り穴である。同様の目的で先のアルミ円盤もいくつかの穴が空けられている。

リンク脚は、本体部において図9で示すねじ移動機構を用い、その移動量をリンク機構により適度に拡大している。リンク機構を用いることで本体部の移動領

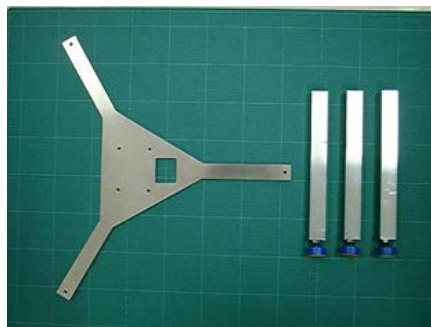


図5 固定脚（分解状態）



図6 固定脚（組立状態）



図7 リンク脚（単体）



図8 リンク脚（組立状態）

域を縮小させ、結果としてデッドスペースの減少、本体部のコンパクト化を図ることができる。さらに本体部への質量の集中化による、安定性の向上も期待できる。

ねじ移動機構は、ねじ部に安価で精度のよいミニチュア樹脂すべりねじ(リード1mm, NTN 製), ガイドに LM ブッシュ($\phi 5\text{mm}$, THK 製)を用い、ねじの軸受け部はアキシアル荷重を受けるため、つば付きミニチュアベアリングを用いている。

リンク機構において、特に3つのリンクが交わる固定端対偶部は強度、精度を得るため、つば付きミニチュアベアリングとシムを組み合わせ、その他の対偶部は組立易さ、軽量化およびコスト面の優位性から、フランジ付き樹脂製滑り軸受を用いている。

さらに軽量化のため、アルミむく材で作られた脚本体および従節に肉抜きを行っている。

次に Z 軸の同期機構を図 10 に示す。歯付きベルト機構を用いて、駆動側となるねじ軸の回転を、同期した状態で他の2本のねじ軸に伝達する。

ねじ軸の軸間距離を歯付きベルトの規格長と正確に合わせることで、テンションプーリを省略し、機構の簡素化と軽量化を行っている。また、ベルトを下部円盤の裏側に配置し、駆動モータをカサ歯車を介して、上部円盤上に水平設置するなど、本体部のデッドスペースを減少させる工夫も行っている。



図 9 ねじ機構

Z 軸の位置センサ調整機構を図 11 に示す。位置決めセンサは、製品組立後もきめ細やかな調整を必要とする事が多く、調整機構として調整時容易に調整でき、かつ調整後は緩み等でずれを生じにくい機構を用いる必要がある。

今回、ダブルナットによる緩み防止機構を応用したセンサ調整機構を用いることで解決を図っている。

1.4 制御部 本課題の制御システムを設計するにあたり、自立型移動装置を対象としたシステムは、その目的によっていくつものシステムを考えることができる。しかし、機械系技術者の多くは、PLC による FA 制御システムに携わるのが一般的であり、さらに本課題が目指す教育訓練の内容を踏まえれば、その制御システムは PLC 制御の延長線上とし、制御技法およびプログラミングを修得が必要と考えている。

本課題の制御システムはコントローラに PLC を用い、センサも FA 用フォトセンサ、及びマイクロ SW を積極的に利用した図 12 に示すシステムとした。制御



図 10 同期機構



図 11 センサ調整機構

部の概略仕様を以下に記す。

- ① 非常停止スイッチの設置
- ② Z 軸は単独, XY 軸は同時に原点復帰する原点復帰スイッチの設置
- ③ スタートスイッチの設置
- ④ 状態表示用 LED の設置

リンク脚の上下移動, X 軸, Y 軸の移動はそれぞれ1個のDCモータで行う。正逆転制御が必要となるDCモータの駆動は、モータドライブ IC を用い回路のコンパクト化を図った。

自律動作を行うため電池駆動とした。ニッカド電池(7.2V, 600mA)を2本直列に接続し、各種装置の電源として用いている。しかし、24V 駆動である PLC 用に別電源が必要となり、今回、電池電圧 14.4V を絶縁型 DC/DC コンバータで 24V に昇圧し、PLC 用電源とした。また、本課題は各種歩行プログラムを実行する際、原点復帰動作を必要とする。原点復帰動作シーケンスを次のように定め、メインプログラムの前に挿入する。

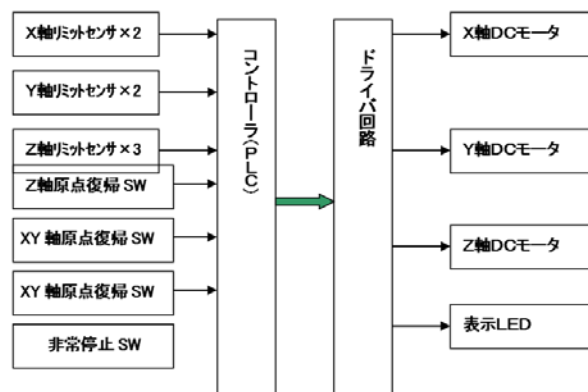


図 12 制御システムブロック図

①Z 軸原点復帰→②XY 軸原点復帰→③スタートスイッチ待ちとするようにした。
1.5 移動機構の仕様 移動機構の仕様を表 1 に示す。

表 1 移動機構の仕様	
装置寸法	W470mm×H400mm×D470mm
装置重量	44.1N
可動範囲	XY 方向40mm、Z 方向30mm
移動速度	XY 方向約90mm/s、Z 方向約15mm/s
可搬重量	約4.9N
制御方式	PLCによるシーケンス制御
駆動電源	7.2V600mAhニッケドバッテリー×2
駆動時間	約20分

1.6 歩行原理

1.6.1 リンク脚による垂直（Z 軸）方向移動 本体の昇降動作はリンク脚を構成する送りねじ機構，および平行運動機構（パンタグラフ）の上下動で行う．平行運動機構は，送りねじ機構の移動量を拡大するために用いる．図 13 に拡大原理を示す．中央図を使って拡大の原理を説明する．条件として四角形 abcd が平行四辺形かつ oap が一直線上にある場合，辺 ob:bc = 1:k となるようにとると，点 o が描いた図形は，点 p において k 倍に拡大される．たとえば図中の例で，辺 ob:bc = 1:k = 32:64 = 2:1 の場合，左図の中央図に対する o 点の変位は 10mm で，それに対する p 点の変位が 20mm となっていることから，結果として移動距離が 2 倍になったことがわかる．

リンク脚はこれらの機構を利用して歩行時に必要となるリンク脚，固定脚双方の昇降作用を担う．

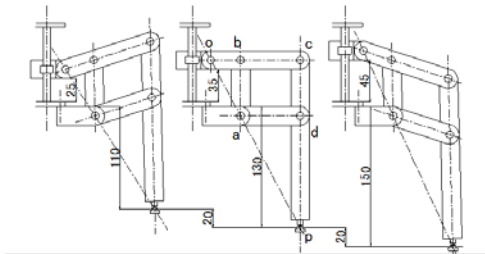


図 13 平行運動機構の原理

1.6.2 XY テーブル機構による水平（X・Y 軸）方向の移動 水平方向の移動はXYテーブル機構により行う．図 14 に示す移動モデルは，リンク脚の上下動によって上昇状態となった脚を，XY テーブルによって任意の方向に移動させる様子を表している．実際の歩行はリンクの上下動と，XY テーブルによる水平移動を交互に行うことにより実現する．図 15 はその様子を表しており，(a)において上昇状態のリンク脚を，進行方向に水平移動させる．(b)においてリンク脚の降下により，固定脚を上昇状態にする．(c)において上昇状態の固定脚を，進行方向に水平移動させる．(d)においてリンク脚の上昇により，リンク脚自身を上昇させ(a)の状態に戻る．(a)(b)(c)(d)各状態を順序よく繰り返すことによって，歩

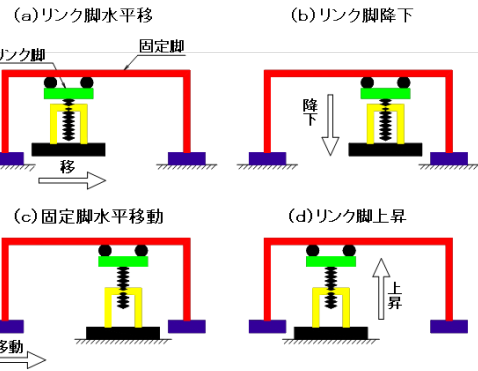
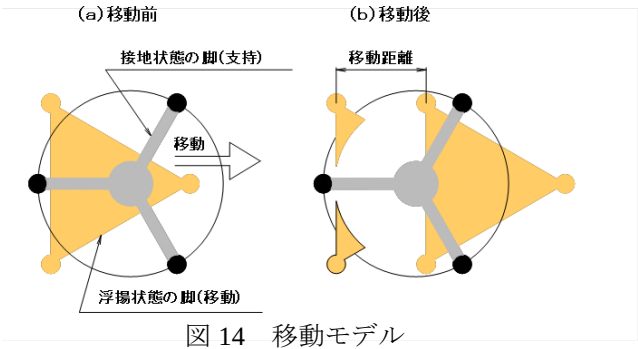


図 15 実際の歩行動作

行による全方向移動を行う．

2. グループ内役割

標準課題を 10 月からスタートとし，前半 3 ヶ月を標準課題 1，後半 3 ヶ月を標準課題 2 として，前半を構想，設計，製図，後半を加工，組立・調整，制御を行うことにした．各グループ構成員を学生数 19 名であるため，3 グループを 5 名，1 グループを 4 名とした．各グループ内の役割を次のように決め，グループ内で話し合い役割を決めることとした．各グループ内役割は，次の通りとした．

2.1 標準課題 1

統括リーダー：グループ全体の運営に責任を持ち，他リーダーの相談・補佐を行う．また，グループの窓口となり発表会等の行事を準備する．

書記リーダー：報告書(週報含む)類，発表用資料(予稿，パワーポイント)等の作成および教官ミーティング等の記録の責任を持つ．

設計リーダー：スケッチ図・CAD 図など図面の承認を行い，図面及び設計計算書作成の責任を持つ．

提出・保管リーダー：提出物の期日管理および整理を行いグループの提出物を責任を持って取りまとめる．また，製作物（図面・データ・製品）や配布器具等の保管管理の責任を持つ．

安全衛生リーダー：安全について責任を持ち，教室の施錠，鍵の管理，また，教室・実習場等の整理・整頓・清掃管理(ゴミ箱含む)の責任を持つ．

2.2 標準課題 2

統括リーダー：グループ全体の運営に責任を持ち，他リーダーの相談・補佐を行う．

書記リーダー：報告書(週報含む)類，発表用資料(予

稿、パワーポイント)等の作成、教官ミーティング等の記録を行う。

提出・保管リーダー：提出物の期日管理および整理を行いグループの提出物を責任を持って取りまとめる。

安全衛生リーダー：安全について責任を持ち、不安全行為が生じた場合、「ヒヤリハット」のチェックを行い再発防止に努める。工具の破損が生じた場合、「破損報告書」のチェックを行い機器担当教官へ提出すること（工具は破損報告と交換で補充する）。また、教室・実習場等の整理・整頓・清掃管理(ゴミ箱含む)の責任を持つ。

このように役割を定め、各役割にリーダーという名称を付け、責任を持たせることにした。

3. 改善点

前年度製作した「六足歩行ロボット」を各グループ1台選び、そのロボットを性能をより高めるための改善を行うことにした。

標準課題1では、改善点を考えるために、まず分解しながらスケッチを行い、そこから改善点をまとめ、変更するポイントの設計、製図を行い、新たな機体の製作を行った。

各グループが考えた改善点は異なるが、洗い出された中で各グループの主な改善点について次に示す。

① 配線の問題点：図16に天板改良の流れを示す。PLCの配線が難しくレールなどに接触、絡まる問題が生じている。改善点：天板に設けられた抜き穴を拡大し、PLCなどを取り付けるための最小限の支持部だけを残す形状に変更した。そうすることで、多くのケーブルを通すための十分なスペースを確保しつつ、コンセプトの「軽量化」を実施することにつながった。

② 部強度不足の問題点：足部は足3本で支えているが、各部の肉抜きが多く強度不足となっている。改善点：足部パーツ肉抜き部の強度を再計算して、形状を見直した。足部パーツ改良部を図17に示す。丸で囲んでいるのが寸法の変えたところである。左の寸法は72mmから50mmへ変更した。右にある○の寸法は40mmから30mmへ変更した。楕円部が曲がっていた場所である。

③ 足位置高さの問題点：3本の足部の上下方向移動時、位置の狂いが生じている。改善点：3本の足部の位置が同じ位置となるように組立・調整時、測定を行いながら、組立を行い、設置ポイントを同じにした。

④ リンク脚関節部の結合に関する問題点：リンク脚関節部の結合方法にピンとなべ小ネジの組み合わせを使っているため関節部に大きな摩擦力がかかり、関節の動きを硬くしている。それによってモータへの負荷が大きくなっている。改善点：ピンとE型止め輪の組み合わせを使用し関節部がスムーズに動くように設計した(図18)。

⑤ 丸足固定方法の問題点：地足可動部にスイベルスクリューを使用しているがスイベルスクリューと丸足を接着剤で固定されているので外れてしまうことがあった。改善点：スイベルスクリューに変わる部品

を自作し、その部品と丸足はねじ止めするように設計した(図19)。

⑥ バッテリーボックスの問題点：バッテリーボックスを装置の下部に設置しているためリンク脚、固定脚を長くする必要があった。改善点：制御基板のすぐ下にバッテリーボックスを設置することにより脚を短くする構造とした。

⑦ モータ動力伝達の問題点：Z軸駆動用モータとZ軸とのトルクの伝達方法がマイタギアになっているため軸が偏心や偏角を起こしていると、マイタギアへの負荷が大きくなり、最悪の場合は歯を傷つけてしまう恐れがある。改善点：Z軸駆動用モータとZ軸とを直接カップリングを用いて接続する構造とした(図20)。

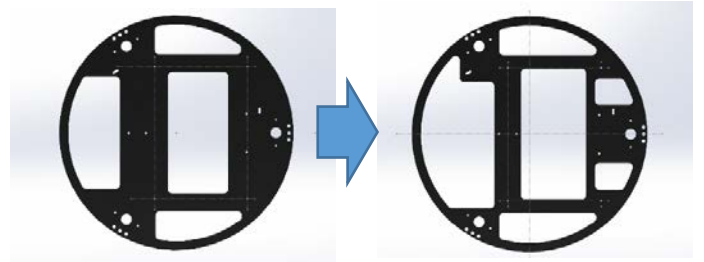


図16 天板

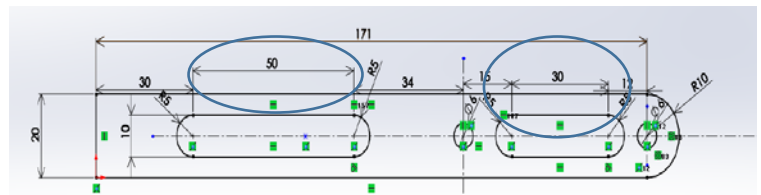


図17 足部パーツ a 改良部



図18 E型止め輪による関節部結合

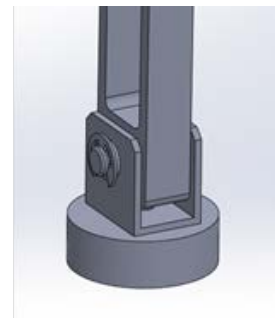


図19 スイベルスクリュー置換え部品



図 20 リジッドカップリングによる結合

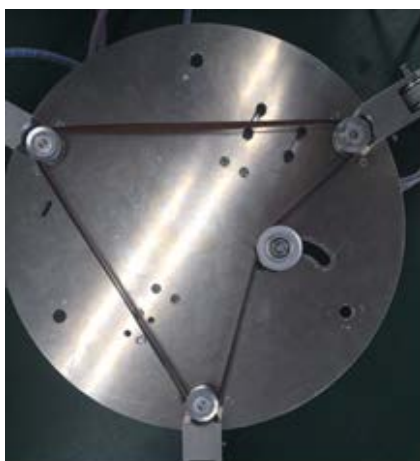


図 21 アイドラを使用したテンション構造

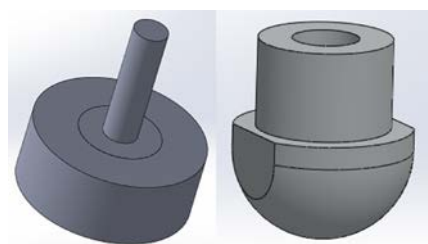
⑧ 移動速度の問題点 Z 軸に使っているすべりネジはリード 1mm の物を使用しているため移動速度が遅かった。改善点：リード 2mm のすべりねじに変更することにより移動速度を高める構造とした。

⑨ Z 軸ベルト張力の問題点 3 本の Z 軸を同期させるための歯付きベルトに張力をかける構造がない。そのためにリンク脚の位置を個々に調整することが出来なかった。改善点：アイドラを使ってテンションをかける構造に変更した(図 21)。

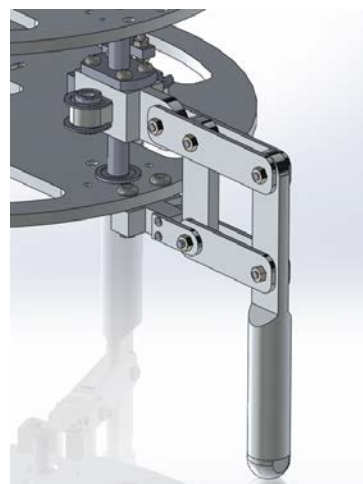
⑩ 脚先端部分接地の問題点 昨年度の脚だと接地の面が広い場合、接地面が平坦ではない場合不安定になると考えた。改善点：脚の先を半球体にすることで接地面と点接触するため安定すると考えた(図 22)。

⑪ XY 軸移動の問題点 XY 軸移動にタイミングベルトとプーリを用いてスライドパック可動部を駆動する構造としている。スペースも大きくなり、張力も張りすぎていてモータへ負荷がかかっている。改善点：ラック&ピニオンを用いることにした。スライドレールについては、軽量化のためアルミフレームを採用することにした(図 23)。

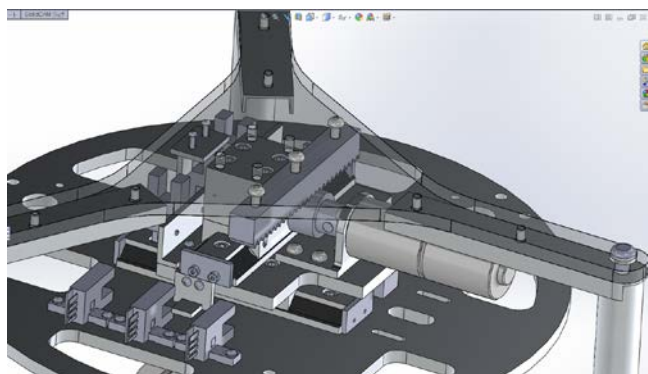
⑫ 足部支え中板強度不足の問題点 昨年度の部品は、構造上応力がかかり変形し、足部の位置のずれが生じ、モータへの負荷がかかり、スムーズな動きが得られない。改善点：足部支え中板へ強度を上げるためにチャンネル材を取り付け、強度を上げるようにした(図 24)。



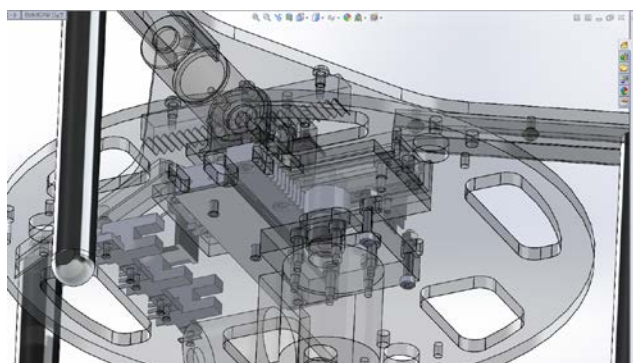
(a) 脚先端部分接地部



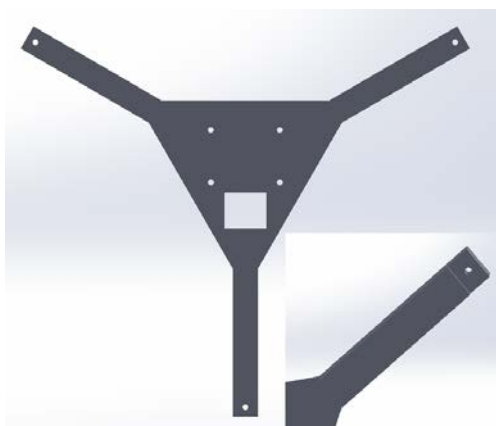
(b) 脚部全体
図 22 脚先端部



(a) X 軸方向



(b) Y 軸方向
図 23 XY 軸部



(a) 足部支え板形状



(b) 足部支え板補強外観
図 24 足部支え板

4. 結果

今年度の標準課題に取り組んだ 4 グループの「六足歩行ロボット」を図 25 に示す. その移動動作は同一だが, 前述のように改善の観点が異なるため, それぞれ特徴を持った形態に仕上がっている.

これらが完成後, 課題開始当初に定めた仕様を満足しているかの検証を行った. 性能が未達であった場合には, その原因についての再検討を行わせた.

このように, 「熟慮した設計であっても期待した性能を示さない」, 「完成後に更なる改善点を発見する」という貴重な経験をできたのではないかと思います.

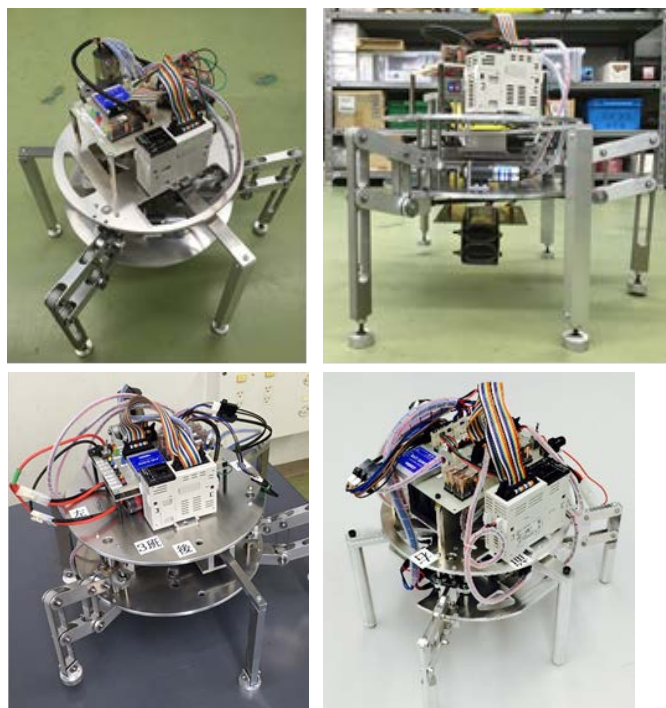


図 25 完成した各六足歩行ロボット

5. おわりに

今年度の標準課題は, 「先輩の製作した製品のコピーを作る」から, 「問題点を発見して改善を加える」という発展形の標準課題として実施した. この結果, 機能と性能を検討して設計を行い, 完成時には性能を測定することで設計を検証する「正しい設計」のあり方を体験できたと考える. 今回は時間制限のある中でロボット全体の設計ではなく, 一部の改善にとどまっていたように見えるが, 確かに従来の「作った. 動いた. 完成!」ではなく, 「評価と反省」が加わった課題となり開発課題につながるものにできたと思う.

また, 考えの異なるメンバーが集まる中で, コミュニケーションやチームワークの大切さを感じながら作業を進めていたようでもある.

製品構想段階から開始する開発課題に取り組むにあたり, この貴重な経験を忘れることなく, 有効に活用してくれることを期待している.

(2016 年 03 月 14 日提出)