

修士論文

永久磁石誘導型天井吸着移動ロボット プラットフォームの構築に関する研究

平成16年2月13日提出

指導教官 森 武俊 助教授

26524 福井 類

目次

目次	2
図目次	5
表目次	10
1 緒論	11
1.1 研究の背景	11
1.2 従来の天井移動機械の整理およびそれらの利点・問題点の分析	14
1.3 本研究の目的	14
1.4 本論文の構成	16
2 天井移動ロボットプラットフォーム	17
2.1 生活空間内分散型アクチュエーションロボット群 (Robotic Room 3)	17
2.1.1 Rototic Room 3 の概要	17
2.1.2 Robotic Room 3 の構成要素	19
2.1.3 Robotic Room 3 における天井移動ロボットプラットフォームの位置づけ	24
2.2 天井移動ロボットプラットフォームの概要	25
2.2.1 コンセプト (実現に必要な二つのキーテクニック)	25
2.2.2 キーテクニック 1 : 天井懸架手法 (モックアップの作成による実現性の確認)	26
2.2.3 キーテクニック 2 : 複数ロボットの同時位置計測方法	30
2.3 プラットフォームの全体構成 (各構成要素の必要機能の整理と実現方法の考察)	32
2.3.1 プラットフォームの全体構成	32
2.3.2 吸着ユニットの必要機能と実現方法の考察	33
2.3.3 移動ユニットの必要機能と実現方法の考察	34
2.3.4 リンクアップユニットの必要機能と実現方法の考察	36
2.3.5 物理支援型アクチュエーションユニットの必要機能と実現方法の考察	37
2.3.6 コントロールネットワークの必要機能と実現方法の考察	40
2.3.7 ロボット動作用天井の必要機能と実現方法の考察	42

3	天井移動ロボットプラットフォームの設計と製作	43
3.1	吸着ユニットの実装	43
3.1.1	天井吸着機能の実装1 (磁石モジュール1号機の設計・製作と性能評価)	44
3.1.2	天井吸着機能の実装2 (磁石モジュール1号機の改良と性能評価)	45
3.1.3	天井吸着機能の実装3 (磁石モジュール2号機の製作と性能評価)	48
3.2	移動ユニットの実装	50
3.2.1	移動機能の実装	50
3.2.2	自己位置認識機能の実装	56
3.2.3	移動ユニット全体設計および組み上げ	60
3.3	リンクアップユニットの実装	62
3.3.1	連結機能の実装	62
3.3.2	過負荷防止機能の実装	62
3.3.3	リンクアップユニットの全体設計・組み上げについて	63
3.4	物理支援型アクチュエーションユニット(クレーンユニット)の実装	66
3.4.1	伸縮機能の実装	66
3.4.2	環境認識機能の実装	71
3.4.3	クレーンユニットの全体設計・組み上げ	73
3.5	コントロールネットワークの実装	76
3.5.1	コントロールネットワークの概要	76
3.5.2	移動ユニット用回路の実装	79
3.5.3	クレーンユニット用コントローラの実装	83
3.5.4	移動ユニット搭載統合PC用ソフトウェアの設計・実装	88
3.5.5	シンプルリモートコントローラの実装	91
3.6	ロボット動作用天井の実装	93
3.6.1	仮設天井平面の製作	93
3.6.2	ロボット動作用天井の製作・施工	94
4	プラットフォームの性能評価実験とその考察	95
4.1	吸着ユニット及びリンクアップユニットの性能確認実験	95
4.2	永久磁石誘導法による移動ユニット移動時のリンクアップユニットの誘導誤差評価実験	95
4.3	2次元コードマトリクスによる移動ユニットの自己位置認識機能の性能評価実験	98
4.4	クレーンユニットの動作確認実験	98
4.5	物体搬送デモ実験	99
5	天井走行ロボットのアプリケーションの提案	101
5.1	動的空間演出システム	101
5.2	天井収納管理ロボットシステム	102

6	結論	104
6.1	総括	104
6.2	将来課題	106
A	ハードウェア計画図	107
B	回路関連資料(回路図・ピンアサイン図)	108
B.1	移動ユニット用電源&シグナル信号分配基板	108
B.2	移動ユニット用モータコントローラ	108
B.3	クレーンユニット用コントローラ	109
C	統合PC用ソフトウェア設計図	113
D	情報支援型アクチュエーションユニット(プロジェクタユニット)の基本設計	114
	参考文献	115
	謝辞	117

目次

1.1	介護用リフト	15
1.2	荷物運搬用トロリー	15
1.3	天井走行クレーン	15
1.4	4足壁面移動ロボット 忍者	15
1.5	電気部品組立用・ロボットアーム群 (Robot World)	15
1.6	天井吊り下げ歩行支援機 (フローラ)	15
2.1	Robotic Room のコンセプト図	17
2.2	最初に作成された知能空間 (RoboticRoom 1)	17
2.3	現在の Robotic Room 2	18
2.4	センサ情報の分析とその出力	18
2.5	ロボティックルーム 3 全体像	19
2.6	床圧力センサ	21
2.7	移動台車	21
2.8	ロボティックキッチン	21
2.9	ロボティックソーサー	21
2.10	ロボティックデスクライト	21
2.11	マニピュレーション台車	21
2.12	プラットフォームのコンセプトスケッチ	25
2.13	レーン型吸着方法	27
2.14	コンデンサ式平面吸着型	27
2.15	永久磁石誘導型吸着法のスケッチ	28
2.16	作成したモックアップ	28
2.17	モックアップの磁気回路部	28
2.18	モックアップで使用した磁石およびヨーク	29
2.19	マスタ統合方式によるロボットの位置計測	30
2.20	スレーブ自律方式によるロボットの位置計測	30
2.21	マスタ統合方式の台数および範囲対コスト	31
2.22	スレーブ自律方式の台数および範囲対コスト	31
2.23	天井吸着移動ロボットプラットフォームの構成	32
2.24	磁気回路ループ・非ループ切替型のスケッチ	34
2.25	着脱力内部保持型のスケッチ	34
2.26	吸着力減少型のスケッチ	34

2.27	吸着・減磁切替型のスケッチ	34
2.28	スライド式連結機構の概要	37
2.29	アーム型伸縮機構のスケッチ	38
2.30	ジャバラ型伸縮機構のスケッチ	38
2.31	ワイヤクレーン型伸縮機構のスケッチ	39
2.32	タケノコ型伸縮機構のスケッチ	39
2.33	コントロールネットワークの概要	40
3.1	磁石モジュール1号機の簡易パース図	44
3.2	“ELF/MAGIC”によるシミュレーション結果の視覚化	44
3.3	磁石モジュール1号機	45
3.4	磁石モジュール1号機(下面)	45
3.5	磁石モジュールの吸着力を測定するスタンド(この写真は磁石モジュールと金属片を対向させて吸着力を測定している様子である。)	46
3.6	測定スタンド内蔵のロードセル	46
3.7	磁石モジュール1号機のシミュレーション結果および実測値の比較	47
3.8	磁石モジュール1号機改良版	47
3.9	磁石モジュール1号機改良版(下面)	47
3.10	1号機から1号機改への変更点	47
3.11	磁石モジュール1号機改のシミュレーション結果および実測値の比較	47
3.12	磁石モジュール2号機のパース図	49
3.13	磁石モジュール2号機	49
3.14	磁石モジュール2号機(下面ボールキャスト)	49
3.15	磁石モジュール2号機のシミュレーション結果および実測値の比較	49
3.16	移動ユニットの移動機構部	51
3.17	ボールキャストによる路面の凹凸吸収機構	51
3.18	移動ユニットの車輛モデル	52
3.19	ブラシレスDCモータアプリケーションデータ(両方のモータで)	54
3.20	ブラシレスDCモータおよびギアヘッドの必要仕様(片方のモータのみ)	54
3.21	採用したブラシレスDCモータ	55
3.22	採用したブラシレスDCモータ及びギアヘッドのカタログデータ	55
3.23	実装したタイミングベルト連結部	55
3.24	実装したローラの側面図	55
3.25	実装したタイミングベルトテンショナ	55
3.26	実装したボールキャスト機構部	55
3.27	QRコードとマイクロQRコードのサンプル	56
3.28	2次元コードリーダ“QD20”	56
3.29	コードリーダより送られるデータのフォーマット	58
3.30	2次元バーコードマトリクスに使用したコードの仕様	58
3.31	2次元コードの向きによる場合分け	58
3.32	コード読み取りにおけるカメラ座標系とシート座標系の関係	58

3.33	移動ユニットのパース図	60
3.34	移動ユニットへの吸着ユニットの取り付け	61
3.35	組み上げた移動ユニット	61
3.36	組み上げた移動の移動機構部と吸着ユニット部	61
3.37	リンクアップユニットの連結機構部	62
3.38	定荷重バネ「コンストンNWT型」	63
3.39	コンストンNWT型（特注）の仕様	63
3.40	リンクアップユニットのパース図	64
3.41	バネを介した磁石モジュールとリンクアップユニットの結合部	65
3.42	組み上げたリンクアップユニット	65
3.43	5段目のステンレスパイプ長さでストロークおよび縮小時長さの関係	68
3.44	クレーンユニットの力学モデル	69
3.45	採用したクレーンユニット用DCモータ	72
3.46	DCモータ及びギアヘッドのカタログデータ	72
3.47	スチールベルトとベルトプーリ	72
3.48	アンギュラマイタによる軸偏向の実装	72
3.49	実装したウォームホルダ	73
3.50	ステンレスパイプとリニアブッシュ	73
3.51	超音波センサ（周方向取り付け）	73
3.52	超音波センサ（下方向取り付け）	73
3.53	クレーンユニットのパーススケッチ	74
3.54	組み上げたクレーンユニットの荷台	75
3.55	クレーンユニットとリンクアップユニットの連結部	75
3.56	伸張時のクレーンユニット	75
3.57	縮小時のクレーンユニット	75
3.58	クレーンユニットとリンクアップユニットの連結作業	75
3.59	コントロールネットワークの全体構成	77
3.60	Vaio U-505（統合PC）	78
3.61	2ポートシリアル拡張カード	78
3.62	Bluetooth USB Stick	79
3.63	移動ユニットに搭載した統合PC	79
3.64	コントロールコマンドのフォーマット	79
3.65	電源・信号分配回路	80
3.66	ブラシレスモータに付属の回路	80
3.67	作成したモータコントロール回路	82
3.68	モータコントロール指令用内部コマンドのフォーマット	82
3.69	移動ユニット用モータコントローラ回路のH8プログラムのフローチャート	83
3.70	クレーンマザー回路のブロック図	84
3.71	クレーンマザー回路基板	84
3.72	Hブリッジ回路基板	85
3.73	Hブリッジ回路の端子入力とモータ動作の関係	85

3.74 シリアル無線回路基板	86
3.75 BluetoothStick の仕様	86
3.76 クレーンコントロール指令用内部コマンドのフォーマット	86
3.77 クレーンユニットコントローラ回路のH 8 プログラムのフローチャート	87
3.78 移動ユニットの経路生成用木構造マップ	89
3.79 統合PC用プログラムの簡易クラス設計図	90
3.80 統合PC用プログラムの実行時画面	92
3.81 シンプルリモートコントローラの実行時画面	92
3.82 仮設天井（右下：印字された2次元バーコード）	93
3.83 RR3内に設置されたロボット動作用天井（下面より）	94
3.84 RR3内に設置されたロボット動作用天井（天井裏支持部）	94
4.1 過負荷防止機能の動作	96
4.2 スティックスリップ現象による追従誤差計測実験のセットアップ	96
4.3 追従誤差実験で用いたリニアスケールの仕様	97
4.4 追従誤差実験で用いたリニアスケール	97
4.5 移動ユニット動作時のリンクアップユニットの追従誤差（移動速度15mm/sec）	97
4.6 移動ユニット動作時のリンクアップユニットの追従誤差（移動速度30mm/sec）	97
4.7 移動ユニットの自動運転とクレーンユニットの伸縮動作を組み合わせた実験	100
5.1 動的空間演出システムのイメージ図	103
5.2 天井収納管理ロボットシステムのイメージ図	103
A.1 磁石モジュール1号機，1号機改良版計画図（図版：03RF01000）	107
A.2 磁石モジュール吸着力測定用台計画図（図版：03RF02000）	107
A.3 磁石モジュール2号機計画図（図版：03RF01C00）	107
A.4 移動ユニット計画図（図版：03RF03000）	107
A.5 リンクアップユニット計画図（図版：03RF04000）	107
A.6 クレーンユニット計画図（図版：03RF05000）	107
B.1 移動ユニット用電源&シグナル信号分配基板	108
B.2 移動ユニット用モータコントローラコネクタNO図	108
B.3 移動ユニット用モータコントローラのピンアサイン図	109
B.4 クレーンユニット用マザー回路コネクタNO図	110
B.5 クレーンユニット用マザー回路のピンアサイン図	110
B.6 クレーンユニット用マザー回路基板回路図	111
B.7 クレーンユニット用Hブリッジ回路図	112
B.8 クレーンユニット用無線基板回路図	112

C.1 統合 PC 用ソフトウェア設計図	113
D.1 プロジェクタユニットのコンセプトスケッチ	114
D.2 クリスマスラン '03 集合写真	120
D.3 Thanks My Skate Shoes !!	120

表目次

2.1	床圧力センサの仕様	20
2.2	移動台車の仕様	22
2.3	ロボティックキッチンの仕様	22
2.4	ロボティックソーサの仕様	23
2.5	ロボティックデスクライトの仕様	23
2.6	マニピュレーション台車の仕様	24
3.1	磁石モジュール2号機の要求仕様・機能	48
3.2	移動ユニットの移動機能における基本仕様	50
3.3	式 3.1 中の変数の説明	52
3.4	式 3.3 中の変数の説明	53
3.5	式 3.4 中の変数の説明	54
3.6	使用した2次元コードリーダーの基本仕様	57
3.7	移動ユニットの基本仕様	61
3.8	伸縮機構の要求仕様	66
3.9	スチールベルトの仕様	67
3.10	採用したアンギュラマイタギアの仕様	68
3.11	採用したウォームギアの仕様	69
3.12	式 3.12 中の変数の説明	70
3.13	式 3.14 中の変数の説明	70
3.14	式 3.15 中の変数の説明	71
3.15	クレーンユニット用 DC モータアプリケーションデータ	71
3.16	採用した超音波センサの仕様	73
3.17	移動ユニット上統合 PC とインターナルコマンド層のシリアル通信の設定	78
3.18	コントロールコマンド一覧	80
3.19	モータコントロール基板に搭載するマイコンの必要仕様	81
3.20	H8-3052F の仕様	81
3.21	モータコントロールコマンドおよびオペランド	82
3.22	クレーンマザー回路基板に搭載するマイコンの必要仕様	84
3.23	クレーンコントロールコマンドおよびオペランド	87
4.1	2次元コードによる移動ユニットの位置推定のおけるばらつき評価実験の結果	98

第1章

緒論

1.1 研究の背景

歴史を振り返ると、これまで人間は自らの単純労働を機械に代替させる試みを行ってきた。現在その機械が知覚を持ち頭脳を備える知能ロボットへと進化し始めている。

人間の生活を観察すると、それは必ずしも複雑な出来事の組み合わせではなく、実に単純なパターンの繰り返しが見られる。生活空間という視点からこの単純なパターンの繰り返しを見てみた場合、そこにはある特定空間の役割もしくは意味づけというものが存在することが分かる。室内空間をある小単位で分割した場合、それぞれの小空間には重要な役割を担うものもあればそうでないものもあることが分かる。この重要度は生活における繰り返しの頻度と密接に関係していると推し量られる。つまり使用頻度の高い小空間ほど重要な役割を担うということである。ここで生活空間で動作するロボットによる人間の単純労働の代替における、ある種の矛盾が生じることが分かる。つまり、ロボットが行うべき単純作業は同時にこれまで人間が頻繁に繰り返してきた作業でもあるということから、本来人間のための空間であった場所にロボットが割り込むこととなり、お互いに空間を譲り合う必要がでてくる。以降、これを「空間の取り合い」の問題と呼ぶことにする。

この空間の取り合いの問題を解決する方法として「そもそもロボットと人間が共有する空間を少なくすることができないか？」というアプローチをとる。もちろん共有空間が少なくても、ロボットに求められる作業をこなせなければ意味がない。そこで普段はロボット専用の空間にいるが必要時に人間の空間にアクセスするという手法を考える。人間の生活空間の中でロボット専用として与えられる可能性がある空間としては天井、床下、壁の中、鴨居などが考えられる。この中で必要時に人間にアクセスするのが一番自然であるのが「天井」である。なぜならば人間は常に地球の重力により床面に拘束され、そしてその重力により全ての物体は本来床に向かって下降を行うからである。つまり天井からのロボットの下降による人へのアクセスは重力による物体の運動というプリミティブなものと同じ運動方向を持つからである。そこで天井面を移動し必要時に人間にアクセスすることにより人間への支援を実現する、天井移動ロボットの実現を研究の大きな目標として掲げる。

ここで天井移動ロボットについて広く分析をするためにロボットの実現形態、構造・機能について考えてみる。まずロボットの実現形態には大きくわけて二つあり、1つがHumanoidのような単体汎用型ロボットであり、もう1つが知的空間をはじめとする分散

統合型ロボットである。単体汎用型ロボットの利点は、もしある程度の汎用性というのが実現できた場合、そのロボットはさまざまな場所に自らを対応させることが可能であり、その活躍の場の広さは計り知れない。しかし一方で、さまざまな機能を一つのロボットが持つ必要があるため、全体のバランスにより搭載できない機能、スペックというのが当然出てくることとなる。具体的には、映像認識のためにカメラ入力および処理を強化させたロボットを考えたとき汎用機にはサイズや処理時間の観点から実装できないという問題や、大きな力を発生させる必要があるときに、1つだけ大きなシリンダやモータを内臓すると、全体のバランスが崩れてしまい、他の機能に影響を及ぼすという問題も考えられる。さらには物体の把持などを行うときには多方向から同時に対象物体およびハンドの状態を観察するのが好ましいのだが、これはHumanoidではハードウェアの構造上実現が困難である。一方で、分散統合型ロボットの利点は各ロボットのタスクをシンプルにでき、そのタスク達成の機能に特化することができるため、組み合わせ次第では単体汎用型では実現できない効率を出すことが可能である点にある。逆に言えば、ある機能に特化することにより、本来目的達成のためには必要でない方法を省くことができ、必要な“役目”を適切な“方法”で行うことができるロボットを組み合わせることによって目的を達成することができるが利点であると言える。例えばヒューマノイドに平面を2次元的に歩行させるのには両足で10自由度近くの関節が必要となる。しかし平面を2次元移動するのが目的であるならば、車輪型のような移動方法を用いるほうが適切な方法であると言えるであろう。以降ではこれを“適所性”と呼ぶことにする。

次に、ある機能に特化することについて考える。ロボットに特化した機能を追求すると「人間にはないロボットならではの特殊な機能」にたどりつくことになる。つまり人間を手本として開発されたロボットはある意味において人間を越えることができない可能性がある、そこであえて人間とは異なる構造、認識器を持つロボットに作業を行わせる意義が重要となってくるのである。ロボット（広くは機械）にしかできない機能には(1)具体的な機構や手法、(2)パラメータの2つの観点があることが分かる。(1)の具体的な機構や手法は例えば空を飛ぶとか、水に浮く、潜るなどがあり、(2)のパラメータとは例えば人間は100kg程度の運搬が限界であるのに対して、機械であれば1t以上のものを運べるなどが考えられる。もちろん、両者は完全に独立ではなく(1)を実現したことによって(2)が実現されるということが多い。

これらの観点から天井移動ロボットを考えてみると、このロボットは“天井面を移動することによって人間との空間の取り合い問題を解決する”という人間には出来ない機能に特化した分散統合型ロボットであると言える。逆の言い方をすればこの天井ロボットが存在すれば完全な支援が実現するわけではなく、他のロボットとの協調が重要であることが分かる。そして分散協調することによりHumanoidのような単体汎用型ロボットでは不可能なことが出来るようになるのである。

最後に天井移動ロボットにおける、適所性および空間の取り合い問題の解決の実現について言及しておきたい。

まず適所性の実現であるが、ロボットが2次元平面を移動するのであれば車輪型の2自由度で可能であるということを中心に述べた。一方でこれには“2次元平面を移動”という条件があり、大きな段差があるような平面はその条件を満たしていないこととなる。しかし天井面を移動させるのであれば段差のない平面をロボットに提供することは容易であ

る。このようにロボットの動作に一番適した空間・環境を与えることが適所性の実現となるのである。同時に、この適所性の実現は分散統合型ロボットだからこそ容易に実現できるとも言えるであろう。

次に空間の取り合いの問題の解決について考えてみると、この実現のために従来では全方向カメラによる移動障害物の認識 [1], 人間の歩行を観察し動線を導き出しそれを利用する方法 [2],[3] などが提案されているが、未だ根本的な解決には到っていない。これらが解決に至らない理由は空間共有において時間方向の分割しか行っていないためと考える。つまりある時刻にある空間になにも存在しなければその空間を利用できるという緩い条件ゆえ、お互いにその空間を利用しようとする頻度が上がり、そこに干渉が生まれるわけである。一方で天井移動ロボットは時間方向のみならず空間自体においても分割を行っているため空間の取り合い問題の解決にたどりつくと考えられる。このアプローチの仕方を空間の時空間分割と呼ぶことにする。この時空間分割における副次的な利点として ”さりげなさ ” というものが挙げられる。人間にはパーソナルスペースと呼び他から侵害されたくない自分を取り巻く空間領域感覚が存在する。その逆に人間は対象と完全に空間を隔てた状態においてその対象を意識することはまずない。つまり時空間分割によりかつての時分割だけのロボットよりも人間の意識を奪うことのない ”さりげない ” 動作が実現されるのである。

以上のように、分散統合型ロボットの利点を生かした適所性の実現、そしてその適所性によって導かれる時空間分割による空間の取り合いの問題解決とさりげない人間支援の実現を可能とする天井移動ロボットを作成することを本研究の目標とする。

1.2 従来の天井移動機械の整理およびそれらの利点・問題点の分析

以下に従来の天井移動機械およびそれに類する機械で代表的なものを取り上げ、それらの利点および問題点を整理する。

1. 介護用リフト [4],[5]・荷物運搬用トロリー (図 1.1,1.2)
【利点】設置が比較的容易。移動のロバスト性が高い
【問題点】移動領域が制限される。複数台の移動ロボットがある場合交差・追越しなどに特別の配慮が必要。
2. 天井走行クレーン [図 1.3]
【利点】構造自体が荷重を支えるので大重量のものを運搬できる。
【問題点】移動部が大きい。同時動作台数が限定されてしまう。
3. 4足壁面移動ロボット忍者 [6],[図 1.4]
【利点】吸着面を選ばず行動範囲の拡張が容易である。
【問題点】吸着に能動的な力が必要であり、常に動力源を必要とする。
4. 電気部品組立用・ロボットアーム群 (Robot World)[7],[8](図 1.5)
【利点】複数台が精度高く移動できる。
【問題点】天井への懸架に能動的な力が必要。天井面の加工が非常に特殊。
5. 天井吊り下げ型歩行支援機 (フローラ) [9](図 1.6)
【利点】単純な機構で比較的大重量が運搬可能。
【問題点】天井の材料が鉄材に限定されてしまう。

以上のように従来の天井移動機械を用いて生活空間内における人間支援を行おうとするには、その移動領域の制限、大型機器の移動による人間生活の侵害、非常時の安全性、施工の難しさなどの問題がネックとなり、実際上安定した支援を実現する環境を整えることは不可能である。

1.3 本研究の目的

前節で述べたように、従来の天井懸架移動機構を用いて生活空間内で動作させる天井移動ロボットを作るにはいくつかの問題がある。そこで本研究ではそれらの問題点を解決した天井懸架手法を考案・開発することを前提に天井吸着移動ロボットプラットフォームの構築を行う。このプラットフォームの構築を通して、天井吸着移動ロボットによる生活空間内における人間支援の有望性を確認することが本研究の目的である。



図 1.1: 介護用リフト



図 1.2: 荷物運搬用トロリー



図 1.3: 天井走行クレーン

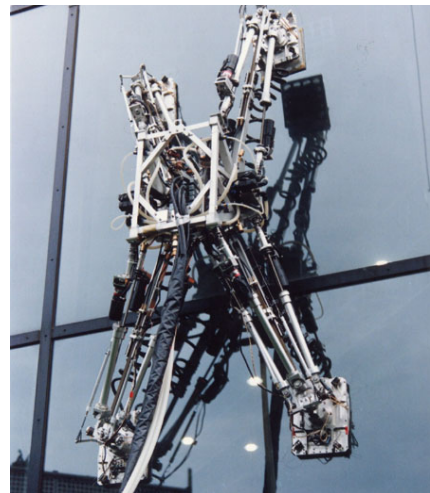


図 1.4: 4足壁面移動ロボット 忍者

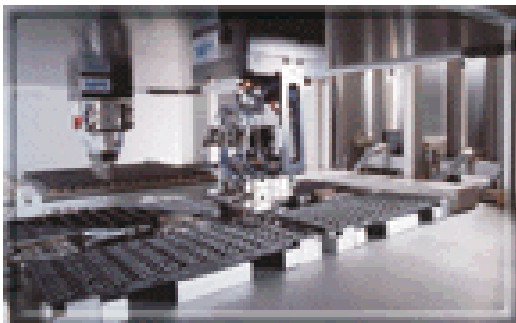


図 1.5: 電気部品組立用・ロボットアーム群 (Robot World)



図 1.6: 天井吊り下げ歩行支援機 (フローラ)

1.4 本論文の構成

第2章では、まず生活空間内の分散アクチュエーションロボットの例として佐藤・森研究室で研究が進められている RoboticRoom3 の現状を示し、その中における本ロボットプラットフォームの位置づけについて述べる。次に天井移動ロボットプラットフォームのコンセプトを示し、その実現のために必要な二つのキーテクニックについて考察する。最後にプラットフォームの全体構成を述べ、各構成要素に必要な機能の整理と実現方法の考察について述べる。

第3章では2章の最後で述べた各構成要素の実装について実際に製作したものを示しながら具体的に述べる。

第4章では製作したプラットフォームの基本的な性能評価実験を行い、次にプラットフォームの応用的な使用を見越した実験を行う。

第5章では本プラットフォームの将来像としてアプリケーションを提案する。

第6章では本論文の総括を述べ、5章で挙げるアプリケーションを実現するために取り組むべき将来課題について述べる。

第2章

天井移動ロボットプラットフォーム

2.1 生活空間内分散型アクチュエーションロボット群 (Robotic Room 3)

本章ではまず現在東京大学工学部 佐藤・森研究室で行われている空間知能化、分散型アクチュエーションのプロジェクト”Robotic Room 3” についてその概要を述べる。そして次に本研究の目標とするプラットフォームの”Robotic Room 3” における位置付けについて述べる。

2.1.1 Rototic Room 3の概要

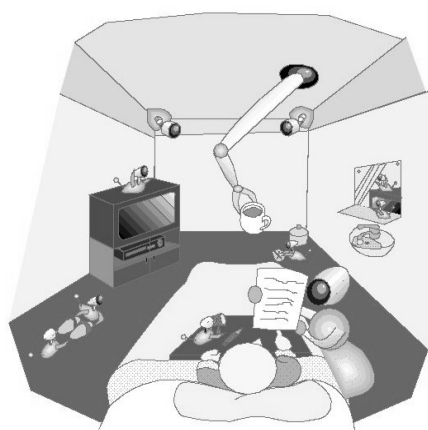


図 2.1: Robotic Room のコンセプト図



図 2.2: 最初に作成された知能空間 (Robotic Room 1)

Robotic Room の誕生

そもそも Robotic Room プロジェクトは佐藤研究室が東京大学先端技術センターに所属したころからのプロジェクト [10] であり、最初の Robotic Room は 1992,3 ~ 1997 年、病

室における介護をテーマとして作成されたものである。以降ではこの Robotic Room のことを” R R ” と記することにする。R R 1 は図 2.1 のように病室のベッドの周りをたくさんのロボットが取り囲み支援を行うというコンセプトがスタートとなり、図 2.2 のようなシステムが構築された。R R 1 には患者の容態をモニタリングするために圧力センサが床面やベッド面に敷き詰められ、また部屋の天井には複数台のカメラが設置され介護対象者の呼吸数などが計測できるようになっていた。物理支援を行うモジュールとしては鴨居の位置を移動するロボットアームが実装されていた。



図 2.3: 現在の Robotic Room 2

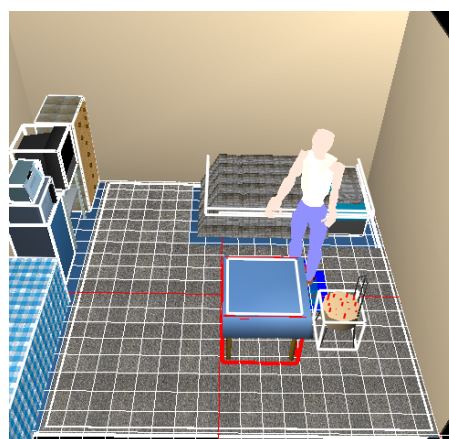


図 2.4: センサ情報の分析とその出力

Robotic Room 2 (Sensing Room) (介護から日常行動情報の蓄積へ)

R R 2 は東京大学工学部機械情報工学科、佐藤・森研究室において 1998 年より現在まで行われているプロジェクト [11] で、この R R 2 においては人間の日常行動を長時間蓄積し、それらを分析することを目的とした仮想生活環境 (図 2.3, 2.4 参照) である。2002 年まではワンルームタイプの部屋を想定し、(ビジョンセンサなど一部のセンサを除き) 環境中で動作する被験者は 1 人と設定していた。しかし 2003 年より複数人への対応を含めた拡張が随時行われている。この R R 2 の主な目的は蓄積された人間の行動を分析することによる情報支援である。この R R 2 関連の研究としては知的空間 (Intelligent Environment) におけるミドルウェア開発 [12], 人間生活情報の要約 (情報圧縮) などが行われている。

Robotic Room 3 (室内生活環境における分散統合型アクチュエータの実現を目指し)

R R 3 は R R 2 同様に佐藤・森研究室で 2000 年より行われているプロジェクトである。R R 3 においては R R 2 で蓄積された人間生活情報の入手に関するノウハウを踏まえて、人間への物理支援を実現するための分散型アクチュエーションロボットを作成している。R R 3 における支援ロボットのキーワードとしては「適所性」と「さりげなさ」が挙げられる。複雑に変動する人間生活環境中で実際に人間に物理支援を行おうとした場合、1 台の完全なロボット形というのはなかなか定まらない。工場などのロボットと異なりロボッ

トの動作環境が変化するのはもちろんのこと、支援対象によって求められる支援の目的・方法が異なるからである。これらの変動に対応するためにはそれぞれの動作に特化したロボットを用意しそれらの特徴を組み合わせることでユーザのニーズを満たすという方法が考えられる。RR3ではこのことを考えて分散統合型のロボット群による人間の支援を目標としている。また「さりげなさ」であるが、生活空間にロボットが存在することによって必ずしも利便性を得られないときがある。たとえば部屋のサイズによっては1台のロボットが動作するあまり、廊下が通りにくくなってしまうということも十分考えられる、このように従来の人間の生活を侵害してしまうようでは意味がない。そこでRR3のロボット群に求められるのは必要なときに「さりげなく」支援を行うということである。次節ではこの目標を実現するために現在までに作成された、または作成中のRR3の構成要素について述べる。

2.1.2 Robotic Room 3の構成要素

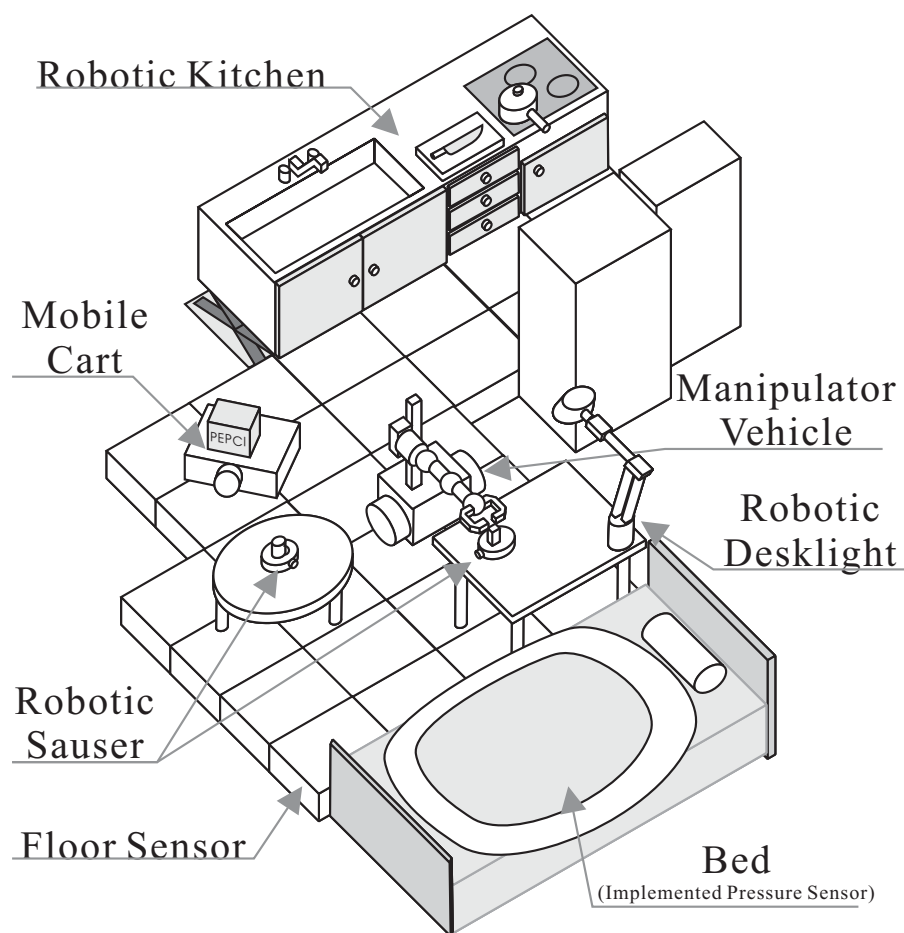


図 2.5: ロボティックルーム3全体像

本節では現在作成されている及び今後作成が予定されている R R 3 の構成要素について説明をする。図 2.5 が R R 3 の全体像を示した図である。R R 3 は人間の動作を計測するために設置された床圧力センサ、この床センサ上で動作する移動台車、ユーザおよびそのユーザの作業状態によって高さの変化するロボティックキッチン、机の上で細かな物品の運搬を行うロボティックソーサ、ユーザの動作や姿勢によって照らす位置・明るさを変更するロボティックデスクライトから構成される。また今後人間の傍らで人と密に接しサポートを行う要素として 6 自由度ハンドを搭載したマニピュレーション台車を追加する予定である。以降で各構成要素についてその概要を述べる。

床圧力センサ

床圧力センサ [13] は人間の位置・移動を計測するために開発されたセンサで、図 2.6 のように床面に敷き詰めて使用する。現在は R R 3 の中心部に 4×4 の 16 枚と以降で示すロボティックキッチンの前に 5×2 の 10 枚が設置されている。今後この床センサを拡張し、部屋のいたるところで人間の位置・移動を計測ができるようにしていく予定である。表 2.1 に床圧力センサの仕様を示す。

表 2.1: 床圧力センサの仕様

Sensing area	2,000 × 2,000 (mm) + 2,500 × 1,000 (mm)
Sensor pitch	7 (mm)
Output data	ON-OFF(1bit)
Transition pressure	25 (kPa)
Sampling frequency	Approx. 16 (Hz)
Data transfer rate	115200 (bps)
Data type	Character based compressed message

移動台車

移動台車 (図 2.7) は前に上げた床圧力センサ上で動作するために開発された運搬ロボットで、その特徴は自立的な位置計測方法は持たずに床センサの情報を頼りとし自己位置の推定を行っているところにある。移動台車の仕様を表 2.2 に示す。

ロボティックキッチン

ロボティックキッチン (図 2.8) は上下高さ変動用の 1 自由度アクチュエータと調理動作認識用の様々なセンサを内蔵したインテリジェントキッチンである。このキッチンは本来調理動作の基本となるキッチンの天板面高さの最適値がユーザによって異なるという仮説に基づき、その実証のために自由にキッチン天板面を上下させることができるキッチンを実現するよう製作され、その仮説の実証を行ったのが第 1 世代である。その後第 2 世代

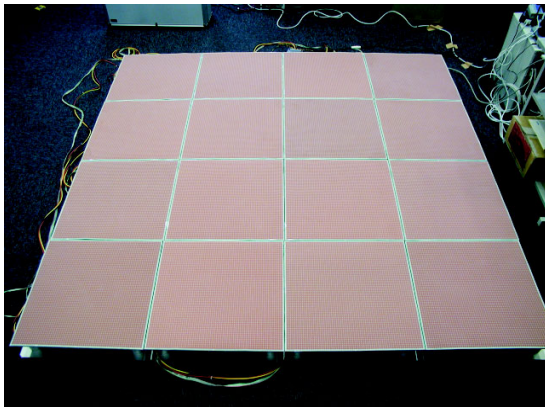


図 2.6: 床圧力センサ

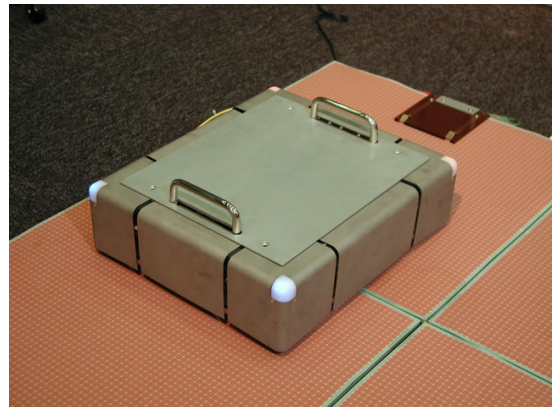


図 2.7: 移動台車



図 2.8: ロボティックキッチン



図 2.9: ロボティックソーサー



図 2.10: ロボティックデスクライト

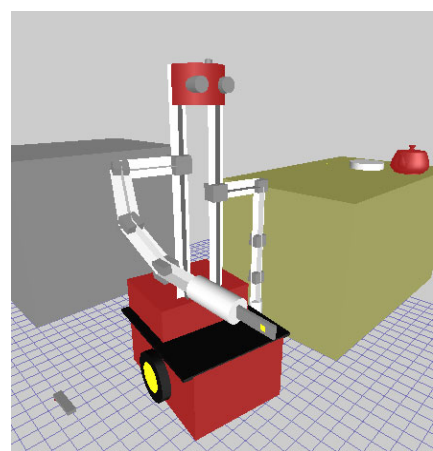


図 2.11: マニピュレーション台車

表 2.2: 移動台車の仕様

Drive mechanism	Two wheels & two ball casters
Actuator	DC motor × 2
Body size	370 × 320 × 160 (mm)
Weight	10 (kg)
Minimum rotation radius	0 (mm)
Max movable load	10 (kg)
Max drive speed	100(mm/sec)
Command transfer	Wireless serial transceiver
Option sensor	2ch touch switch × 16 Load cell × 4
Informative output	2 (red & blue) leds × 4 corners

の研究ではたくさんの調理動作センサが実装され、調理動作認識アルゴリズムにより調理動作を推定、その推定された動作およびユーザからのマニュアル入力による高さ指定によってキッチン天板高さを変更するという支援を行った。現在は第3世代の研究として、調理行動認識アルゴリズムの高度化およびセンサの追加による認識可能動作の拡張と認識率の上昇を目指して開発が行われている。表 2.3 にロボティックキッチンの仕様を示す。

表 2.3: ロボティックキッチンの仕様

Top plate size	2,550 × 600 (mm)
Actuator	1(hp) AC motor × 1
Height change range	750 ~ 900 (mm)
Average elevation speed	10 (mm/sec)
Command transfer	Wireless serial transceiver
Implemented sensor	Flow meter @ water taps × 2 Vibration sensor @ top plate × 4 Heater current sensor @ Halogen heater range × 2 Door open detect switch × 7 SW-on detector @ range exhaust fan and light × 2

ロボティックソーサ

ロボティックソーサ (図 2.9) は机上における小型物の運搬のために作成されたユニットである。外部に設置されたビジョンによる制御を想定されている。表 2.4 にロボティッ

クソーサの仕様を示す。

表 2.4: ロボティックソーサの仕様

Drive mechanism	Two wheels & two ball casters
Actuator	DC motor × 2
Body size	Diameter 170(mm), Height 30 (mm)
Weight	0.7 (kg)
Minimum rotation radius	0 (mm)
Max movable load	Over 1 (kg)
Max drive speed	55 (mm/sec)
Command transfer	Bluetooth Wireless serial transceiver
Option sensor	Touch switch × 6 Load cell × 3
Navigation Method	CCD camera visual feedback

ロボティックデスクライト

ロボティックデスクライト (図 2.10) はデスク横に設置されるモータ内蔵のデスクライトで、その特徴はモータによるライト位置・方向の制御を行いつつも、人間からの強制的な姿勢補正を受け入れるところにある。このデスクライトは人間との直接的なコンタクトを積極的に取り入れるユニットの1つである。現在人間の動作によって照らす場所・明るさを自動的に設定するアルゴリズムの実装を行っている。このデスクライトの仕様を表 2.5 に示す。

表 2.5: ロボティックデスクライトの仕様

DOF	5 (DOF)
Light tip locomotion speed	100 ~ 200 (mm/sec)
Command transfer	RS232C serial signal (115.2kbps)
Actuator	Electric cylinder × 2 DC motor with slip clutch × 3
Implemented sensor & Option sensor	2 Load Cell @ electric cylinders. Potentiometer @ slip clutch Motor implemented encoder @ DC motor Light brightness setting encoder Light On Switch × 1

マニピュレーション台車（開発中）

このマニピュレーション台車は現在開発中であり、おもにRR3内で人の傍らで人と密に接することによりサポートを行うモジュールとして物体の把持と搬送を担うべく開発が行われている。図2.11は完成後のマニピュレーション台車のイメージCGであり、表2.6は現在の暫定的な仕様である。

表 2.6: マニピュレーション台車の仕様

Cart Part	
Drive mechanism	Two wheels & one caster
Actuator	DC motor × 2
Body size	380(w) × 440(l) × 215(h) (mm)
Weight	9.0 (kg)
Minimum rotation radius	0 (mm)
Max movable load	23 (kg)
Max drive speed	1,400(mm/sec)
Implemented sensor	2 encoder @ DC motor
Option sensor	Ultrasonic Sonar × 8

Arm Part	
DOF	6 (DOF)
Actuator	Miniature DC motor × 6
Arm Angle speed	15 ~ 20 (rpm)
Liner motion speed	400 (mm/sec)
Actuator	DC motor × 6
Implemented sensor & Option sensor	Force sensor × 4 @ gripper IR sensor × 8 @ gripper Encoder × 6 Pin hole CCD camera × 1 @ gripper CCD camera × 1 @ hand

2.1.3 Robotic Room 3における天井移動ロボットプラットフォームの位置づけ

RR3ではロボットによる人間への物理支援を目標としているので、ロボットの中にはロボティックデスクライトやロボティックソーサのように率先して人とコンタクトをとろうとするユニットがある。一方で今回構築しようとしている天井移動ロボットは人へのア

クセスを必要最小限に限定するものである。
これはロボットによる人間の支援には

- 人の傍で人と密に接することで支援を達成できるもの
- 人の周囲でさりげなく行われるべきもの

の二通りがあると考えられ、本天井移動ロボットは後者の方を担うロボットであると考えているからである。

2.2 天井移動ロボットプラットフォームの概要

本章では最初に本研究が目指すプラットフォームのイメージを示す。そして目標とするプラットフォームを実現するために重要な2つのキーとなる技術に関して問題を整理し、それぞれの実現方法について考察をする。

2.2.1 コンセプト（実現に必要な二つのキーテクニック）

まず本研究が目指すプラットフォームのイメージを図 2.12 に示す。このコンセプトス

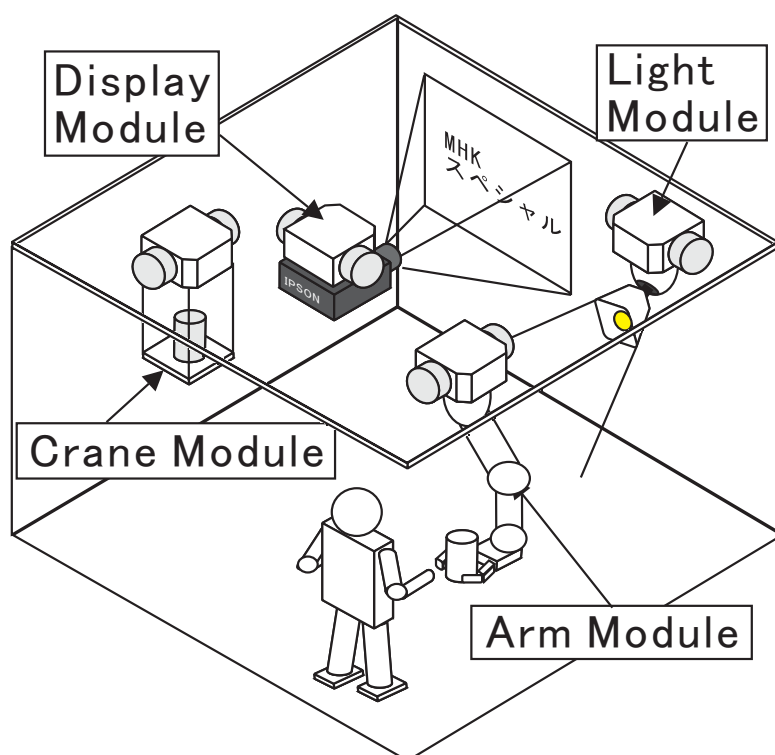


図 2.12: プラットフォームのコンセプトスケッチ

ケッチは天井面にさまざまな動作目的を持ったロボットが共存・移動し、また必要時には

天井下面よりアクチュエータを伸ばすことで、人間への支援を行うということを示している。本プラットフォームのポイントをまとめると次の二つになる。

- 特殊な天井材料ではなくともロボットが天井面で支えられ、範囲を制限されず移動できること。
- 複数台のロボットが同時にプラットフォーム上で動作することができること。

これら2つのポイントを実現するためには、それぞれキーテクニックとなるものが必要となる。特殊な材料ではない天井をロボットに移動させるためには「天井懸架手法」が重要となり、複数台のロボットが同一の環境にいて動作するためには「複数ロボットの同時位置計測」が重要となる。以降では、この二つのキーテクニックについて実現方法を踏まえながら述べる。

2.2.2 キーテクニック1：天井懸架手法（モックアップの作成による実現性の確認）

まず今回のプラットフォームの天井懸架方法の条件を以下にまとめる。

1. ロボットが天井を移動するのに実装面・安全面から十分な懸架保持力を出せること
2. ロボットが2次元的に制限されることなく動作可能なこと
3. 天井材料は鉄材など特別なものに限定されず、またその天井の加工・施工も比較的容易であること。
4. 懸架に能動的なエネルギーを必要としないこと。つまり（電力等の）エネルギーの供給がなくても懸架状態を持続できること

以上の4条件を踏まえつつ、考えられる天井懸架手法を出来るだけ列挙しそれぞれの機構と特徴および問題点をまとめた。以降で考察した方式を示す。

1. レール式 介護用リフト [4]・荷物運搬用トロリーなどに用いられている方法でレールに移動部がぶら下がるという形態の方式
2. レーン型 (X,Yレーン型) 図2.13に示すような方式でXY軸方向にスリットの入った天井面上でスリットに支えとなる柱を通すことにより天井面に吊り下がる方式
3. ブリッジ型 工場用のクレーン [図1.3]などに用いられている方法で橋げたごと橋または梁が動くような仕組みで移動する方式
4. 平面吸着型 ある平面に対して何らかの力を働かせて吸着する方式

レール式とレーン式は共に安定性が高く動作することが可能であるが、2次元平面を自由に動作させようと考えた場合レールの本数やスリットの数を見ると実装上動作領域をの制限を完全になくすことは難しい。ブリッジ型も安定性と可搬重量の大きさに利点があるのだが、やはり稼動部の大きさが威圧感を与えてしまうという問題があり、部屋の中で用いるには好ましくない、また複数台を動作させるときの交差の問題を解決することができないという欠点がある。一方で平面吸着型は自由度の高さが期待できるという利点がある。そこで平面吸着型を採用することとし、次に吸着力の発生源として以下のようなものが考察した。

1. 永久磁石式 天井面を鉄板など磁性材料にし、移動ロボット側に永久磁石を取り付けて吸着させる方法
2. 電磁石式 永久磁石の代わりに電磁石を用いる方法
3. 空気減圧式 吸盤のようなものを移動ロボットに取り付けてその中の空気を減圧させることによって吸着させる方法
4. コンデンサ式 図 2.14 に示すように天井面をコンデンサの極板に見立てて、ロボット側にも極板を用意し両者の間に電圧を印加し極板間引力により吸着させる方法。

磁石を用いる場合天井材料が鉄材に限定されてしまうため一般の天井材料としては異色であり内装の面からも必ずしも最良の方法とはいえない。一方で電磁石、空気減圧、コンデンサなどは吸着には安定した電源の供給が必要となり、たとえば停電時の安全性などを確保するのが難しいという欠点がある。またコンデンサ式は大重量のものを吸着するためには計算上非常に大きな極板が必要となり現実的ではない。以上の考察の結果それぞれの問

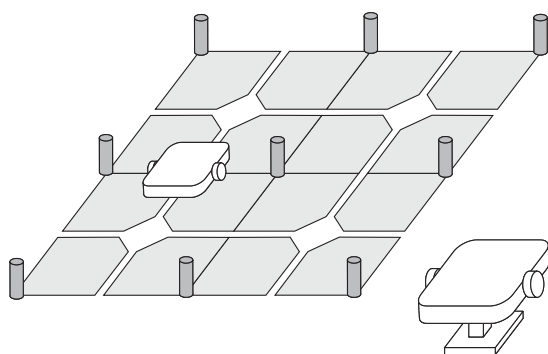


図 2.13: レーン型吸着方法

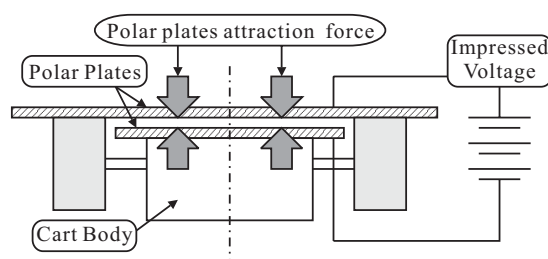


図 2.14: コンデンサ式平面吸着型

題点を解決する可能性のある、“永久磁石誘導型吸着法”を考案した。図 2.15 にその概要を示す。この方法は非常に単純な仕組みで、天井面を挟んで2つの永久磁石を対向させ、上側の磁石が移動すると磁路を保持しようと下の磁石が誘導されるというものである。実際には対向する2つの磁石の位置がずれると、磁路が天井面に対して傾くため水平方向の力が発生し、下の磁石が誘導されるという現象を利用している。この上側の移動を走行ロボットに行わせることによって天井下面に吸着したハンドリングロボットの物体搬送等を

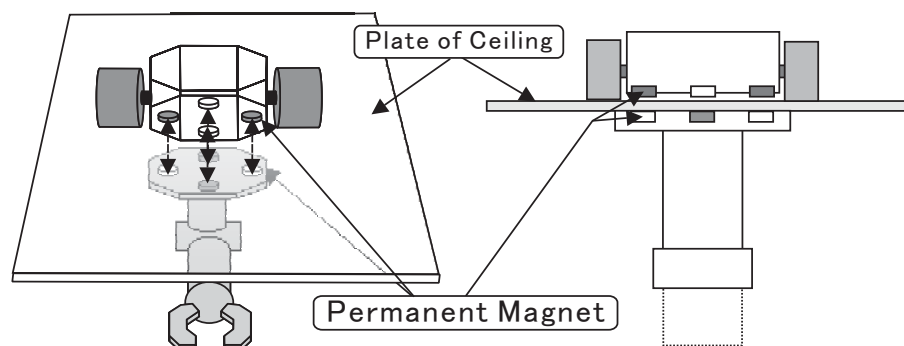


図 2.15: 永久磁石誘導型吸着法のスケッチ

実行させることができる。この手法による天井移動ロボットの実現性を確認するために図 2.16, 2.17 に示すようなモックアップを作成した。このモックアップは上部ユニットに移動

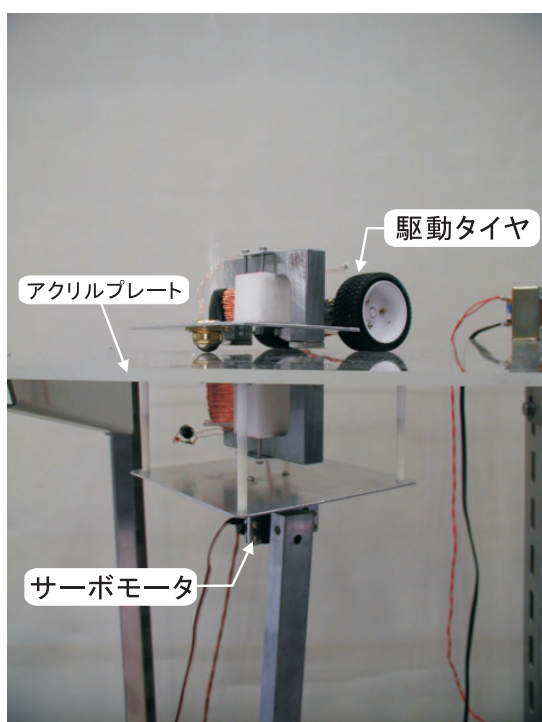


図 2.16: 作成したモックアップ

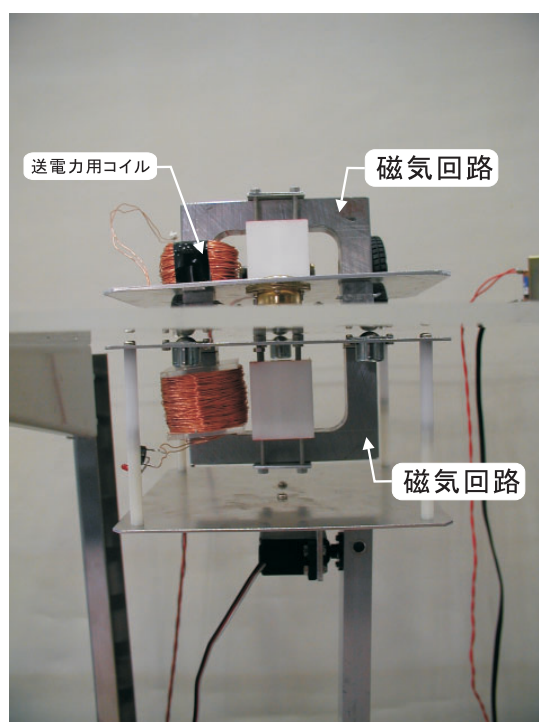


図 2.17: モックアップの磁気回路部

用の2つのモータおよびタイヤを持ち、下部ユニットにはアクチュエートを模擬し、アクチュエータが吸着状態に及ぼす影響を調べるためのサーボモータが1つ実装されている。また上下のユニットで電力を伝送するために、それぞれに送電力用のコイルが実装している。図 2.18 にモックアップで使用した磁気回路の寸法等を示すが、この時点では磁気回路のシミュレートなどは行っていないので、このヨークにはほとんど効果がないことが作成の後判明している。その理由はヨークの経路を必要以上に長く作り過ぎたため磁路が

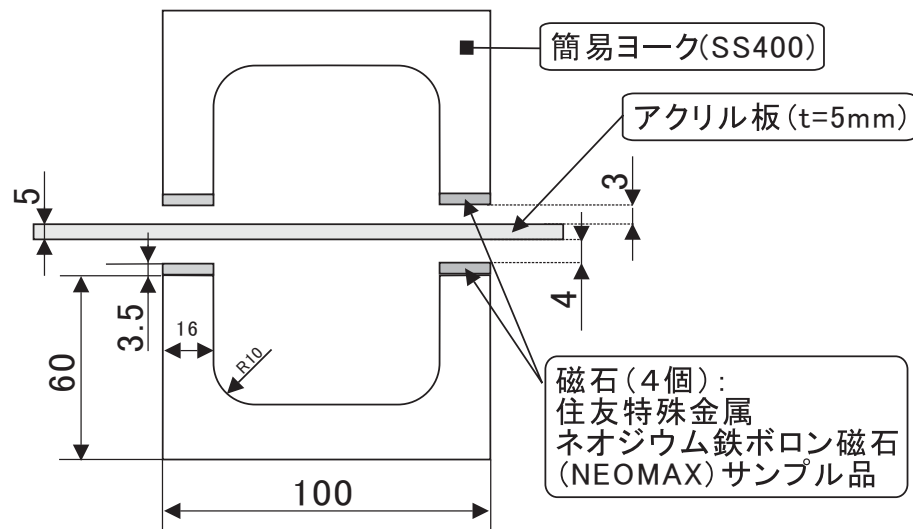


図 2.18: モックアップで使用した磁石およびヨーク

ループを描くことなく途中で全て外部に漏れてしまっていることにある。このモックアップの上部ユニットの2つのタイヤをモータで動作させ、直進・旋回を行ったところ下部ユニットがそれに追従して移動・旋回を行った。また下部ユニットに取り付けたサーボモータを動作させても天井吸着状態には影響が見られなかった。磁気回路の構成には問題があるものの、このモックアップの作成により永久磁石誘導型吸着法によって、ロボットに天井面を移動させ、下面においてアクチュエータを動作させることが可能であることが確認された。また電力の伝送であるが、100V,50(Hz)の交流電源をトランスによって20(V)に減圧し、コイルを通して伝送したところLEDを点灯させる程度の電力伝送には問題がなかったが、伝送した電力の蓄電方法など技術に難しい課題があるので今回はモックアップでの試しのみにとどめておく。

2.2.3 キーテクニック 2：複数ロボットの同時位置計測方法

複数の移動ロボットの位置を同時に計測するためには大きく分けて次の二つの手法が考えられる。その二つの分類を例を挙げて説明し、それぞれの利点・欠点をまとめる。

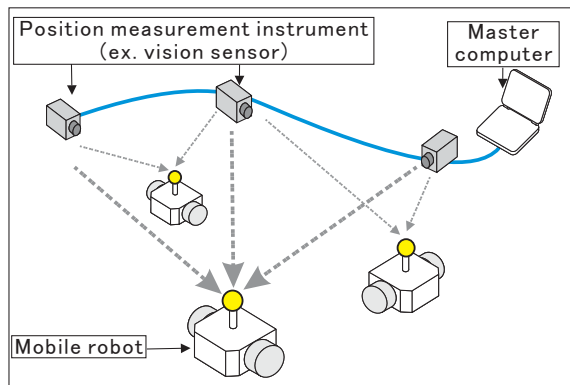


図 2.19: マスタ統合方式によるロボットの位置計測

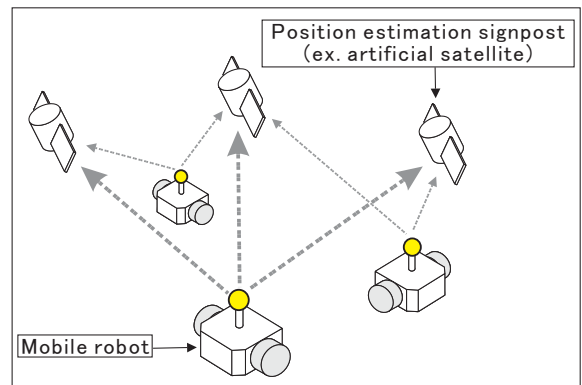


図 2.20: スレーブ自律方式によるロボットの位置計測

- “マスタ統合方式” 図 2.19 のように複数の計測器の情報を 1 つのマスタとなるコンピュータに集め、全てのロボットの位置を探し出し計測する。

【例】”光学式モーションキャプチャ”:光学式モーションキャプチャは複数台のカメラ映像を 1 台のマスタとなるコンピュータに接続し演算を行うことによって位置・角度などを計算している。

【利点】マスタとなる計測器 + コンピュータに位置の計測の機能を任せることができるので、各ロボットの実装が楽になり、台数の増加時にはコストの面で有利になることが期待できる。

【欠点】ロボットはマスタの探索範囲に常にいることが求められ、行動範囲が限定されてしまう。
- “スレーブ自律方式” 図 2.20 のようにそれぞれのロボットにセンサを実装しそのセンサに対応する環境を用意することによって、各ロボットが位置を自主的に手に入れる。

【例】”衛星を利用した GPS”:GPS は各機器が上空の衛星を自主的に探しだし、それらの位置関係により自分の位置を推測している。

【利点】各ロボットが自主的に動作するので、マスタとなる優秀なコンピュータが必要なく、またそのため行動範囲の拡張も容易である。

【欠点】各ロボットのタスクが増え、台数が増えると実装時のコストが上がってしまう。

それぞれの利点および欠点を視覚化すると図 2.21, 2.22 のようなグラフで表される。図 2.21 においてはコストはロボットの動作範囲に比例するものの動作台数にはよらないこと

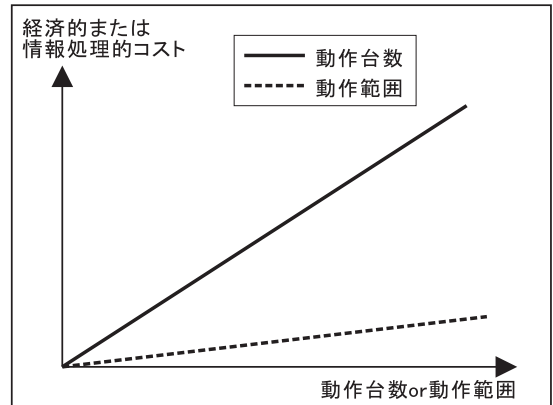
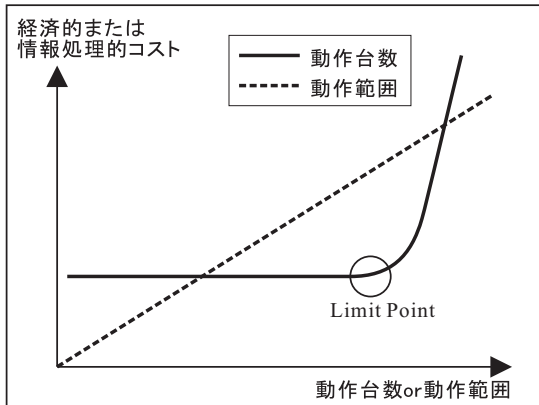


図 2.21: マスタ統合方式の台数および範囲対コスト
 図 2.22: スレーブ自律方式の台数および範囲対コスト

が示されている。また、図中の”Limit Point”とは計測器のサンプリング周期×動作台数がロボットの制御ループ時間を上回ってしまい計測・制御ができなくなる瞬間を示している。

図 2.22 ではコストがロボットの台数に比例して大きく増えることおよび動作範囲の拡張でわずかにコストが上昇することを示している。今回は各ロボットの行動範囲の拡張の容易さと自律性を優先して後者の方法を採用することとした。

2.3 プラットフォームの全体構成 (各構成要素の必要機能の整理と実現方法の考察)

本章ではまずプラットフォームの全体構成を示し、その後それぞれの構成要素に必要なとされる機能を整理し、それらの実現方法に関する考察について述べる。

2.3.1 プラットフォームの全体構成

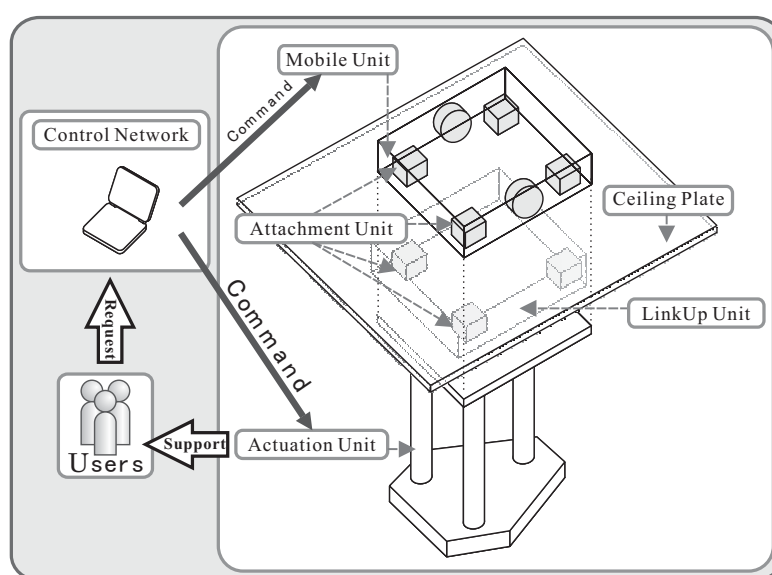


図 2.23: 天井吸着移動ロボットプラットフォームの構成

本プラットフォームは図 2.23 に示すように、

1. ロボットが天井面に吸着するためのコア要素となる吸着ユニット
2. 天井上面で2次元的に移動(走行)する移動ユニット
3. 天井下面で吸着ユニットに吊り下がり、下部に様々なアクチュエータを連結させるリンクアップユニット
4. リンクアップユニットに連結し天井下面にて人間にアクセスすることによって支援を行うアクチュエーションユニット
5. 移動ユニットおよびアクチュエーションユニットを制御するコントロールネットワーク
6. ロボット動作用天井

から構成される。以降でそれぞれの必要機能および実現方法に関する考察の詳細を述べる。

2.3.2 吸着ユニットの必要機能と実現方法の考察

本章では、モックアップにより実現の可能性が確認できた“永久磁石誘導型吸着法”を実際のロボットに適用するための実現方法についての考察を行う。まず吸着ユニットに求められるロボットが天井面に吸着させる機能を天井吸着機能と呼ぶことにする。この機能の実現について以降で述べる。

天井吸着機能

以降ではこの吸着機能を実現する磁気回路のことを“磁石モジュール”と呼ぶ。この磁石モジュールに求められる基本的な仕様およびその実現方法の考察について述べる。

今回のアプリケーションにおける磁石モジュールには次のような基本仕様が求められる。

- 実装および安全上十分な吸着力を持つ。
必要な吸着力は天井下面でどのような機能や機構をもったユニットを動作させるかによって異なる。人間とのインタラクションを持つことになるユニットの場合、当然安全面での制限が厳しくなる。そこで今回作成する下部ユニットの想定重量制限を満たす必要がある。
- 必要に応じて吸着力を減少させることができる。
永久磁石を用いている関係上、この機能がないと永久に天井面から外すことができなくなりメンテナンスが行えなくなってしまう。また強力な吸着力を持ったままの磁石を露出して保管することは安全管理上好ましくない。

前者の実現のために比較的安価で大きな吸着力を持つ、ネオジウム鉄ボロン系の磁石を採用した。このネオジウム鉄ボロン系の磁石は従来のフェライト系磁石に比べると4～10倍近い最大磁気エネルギー積を示し、1980年代まで最大のエネルギー積を示していたサマリウムコバルト系よりも安価でかつ大きな吸着力（最大磁気エネルギー積で1.5倍程）を示すという利点を持っている（参照文献 [15],[16],[17]）。後者の実現のために、磁石の個数や磁気回路構成を考えて、以下のような4つの方法を検討した。

1. 磁気回路ループ・非ループ切替型
2. 着脱力内部保持型
3. 吸着力減少型
4. 吸着・減磁切替型

まず磁気回路ループ・非ループ切替型は図 2.24 に示すように一般にマグネットチャックに使用されている方法である。その利点は比較的簡単な機構で完全に吸着力を無くすることができることであるが、一方でヨークの加工が複雑であり、瞬間的に吸着力を減らすことはできない。

次に、着脱力内部保持型は鶴氏らが開発した手法 [14] で、図 2.25 に示すように吸着した

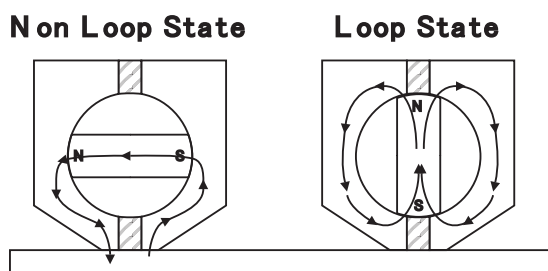


図 2.24: 磁気回路ループ・非ループ切替型のスケッチ

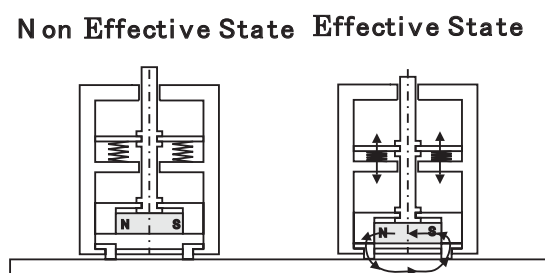


図 2.25: 着脱力内部保持型のスケッチ

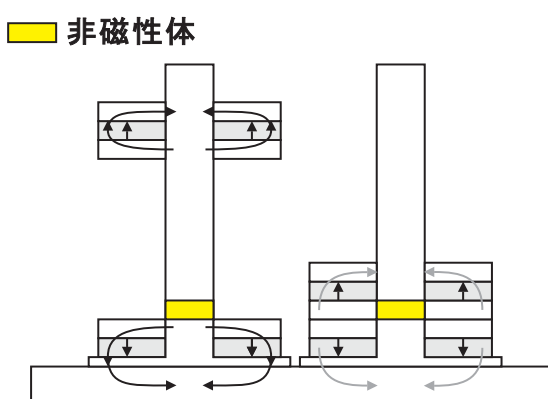


図 2.26: 吸着力減少型のスケッチ

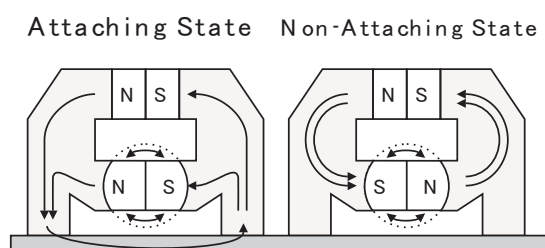


図 2.27: 吸着・減磁切替型のスケッチ

状態で次に脱着するための力をモジュール内部のバネに蓄えるというものである。この利点は切替のレスポンスの良さであるが、吸着力をなくした状態を保持することが難しいという問題がある。

3つめの吸着力減少型は図 2.26 に示すように2つの磁石を用い、1つは吸着用にそしてもう1つを吸着力の減少用に使用するというものである。その利点は機構が非常に簡単であることだが、磁石1つを吸着力減少のためだけに用いるという欠点がある。

そして最後の吸着・減磁切替型は図 2.27 に示すような、”磁気回路ループ・非ループ切替型”と”吸着力減少型”をあわせたような方法で、その利点は減磁用のループがそのまま吸着用の磁路として使えることである。しかしやはり複数個の磁石が必要ということでそのコストは無視できない。

以上のような方法を検討した結果、今回は一番実用例が多い”磁気回路ループ・非ループ切替型”を採用することにした。また意図せずヨーク内でループしてしまう磁気を減らし、確実に吸着力を得るために、磁気回路ループ用のヨークおよび非ループ用のヨークをそれぞれ独立に用意することにした。

2.3.3 移動ユニットの必要機能と実現方法の考察

移動ユニットに必要な機能は

- 移動機能
- 自己位置認識機能

の2つである。以降でそれぞれの機能の実現方法の考察について述べる。

移動機能

移動ロボットの移動方法は大きく分けて走行型と歩行型の2種類がある。走行型はタイヤやボールなどを接地・回転させて本体を移動させるというものであり、歩行型はロボットに複数の脚を取り付けそれにより歩行動作を行わせ移動させるというものである。今回は移動のロバスト性を重要視し走行型を選ぶこととした。

次に走行型のタイプをそれぞれの特徴の説明と共に列挙する。

- 対向2輪型（2輪駆動1キャスト）
比較的作成が容易であり、またオドメトリなどにおける数式が簡単である。そして旋回半径が小さいので小回りが効く。
- ステアリング型（1輪駆動1ステアリング）操舵用のモータと動力用のモータを異なる出力にすることができ、大きな馬力が必要な場合に有用である。
- 全方向移動タイプ（複数駆動輪交差）その場旋回なしに多方向への移動ができるので移動の効率がよい反面、タイヤ周りの製作においてある程度の技術が必要となる。

今回は移動機構では機構自体がシンプルで、確実に動作することを重要視し、対向二輪型を採用することとした。

自己位置認識機能

2.2.3節で述べたように、今回の自己位置認識機能においては「各ロボットがセンサを実装し自分の位置を自主的に手に入れる」というスレーブ自律方式を採用することとした。この方法において問題となるのが、各ロボットが如何に正確に自分の位置を取得するかということである。換言すると単体のロボットに実装できる位置計測方法でどれだけの精度が出せるかという課題となる。ランドマークとなる画像をカメラで入手し、それを元にロボットの位置を取得するという手法がさまざまな研究で実装されているが、今回は知的環境という観点から、その手法をさらに発展させて、ロボットの移動領域全体にランドマークとなるマーカを埋め込むことを考えた。このとき本来スレーブ自律方式の利点として挙げられている「行動範囲の拡張性の容易さ」を妨げるものであってはならない。マーカとして有名なのが工場の運搬台車などで用いられているライントレース方式であるが、これは2次元平面を自由に移動するロボットに用いるのにはふさわしくない。このライントレースを2次元平面に拡張したものとして碁盤の目上にラインを引いて、跨いだラインの数によって現在の位置を推定する方法があるが、これは跨いだラインの本数のカウントに失敗したときには新たにキャリブレーションをする必要があるという問題点がある。そこで本研究ではこれらの問題点を解決する安価なマーカとして2次元コードの利用

を考えた。この2次元コードに位置（座標）の情報を書き込んだものを移動領域全体に書き込むことで、移動ロボットが自主的に位置を取得できる環境を用意するのである。採用したコードおよび読み取り方法などについては後の3.2.2章で詳細を述べる。

2.3.4 リンクアップユニットの必要機能と実現方法の考察

リンクアップユニットの必要機能を整理すると以下の二つとなる。

- 連結機能
リンクアップユニットは下部に様々なアクチュエータが連結されることになる。そのため各アクチュエータとの接続および固定がスムーズに行える連結機能が必要とされる。
- 過負荷防止機能
また過負荷防止機能は吸着ユニットの安全面を補う機能で、吸着ユニットの仕様を超えた重量負荷が掛かった場合に天井からロボットが落下するといった事態を防止するための機能である。

連結機能

本リンクアップユニットとアクチュエーションユニットの連結機能に求められるのは、

- 連結および非連結の切替が容易であること
- 連結固定時に不慮の事故などにより落下が起きないこと
- 将来ロボットにより自動で取り外しを行うことが可能であること

の3点である。比較的単純な連結機構として二つの結合部にねじ山を設けるネジ式、電車の連結部のようにお互いに相手側を受け止める構造を持つはめ込み式などを考えたが、以上の3点を満たしているとは言えない、そこで今回は図2.28に示すようなスライド式と呼ぶ方法を採用することにした。この方法は本棚に棚板を挿入するのと同じように、リンクアップユニットに棚板支え用の支持部を複数設け、アクチュエーションユニット側にはその支持部にきっちりとはまるサイズの板を取り付けるという方法である。詳しい機構については後の実装の章で述べる。

過負荷防止機能

前述したように、過負荷防止機能とは吸着機能の安全面を補うために、吸着機能の仕様を超えた重量負荷が掛かった場合に天井からロボットが落下するといった事態を防止する機能である。これを実現するためには2つの考え方がある。

- 磁石モジュールの吸着力を補うために能動的な吸着力増強機構を取り入れる。
- 磁石モジュールの吸着力以上の力が加わった場合、その力が磁石モジュール側に伝わらないようにすることによって落下を防ぐ。

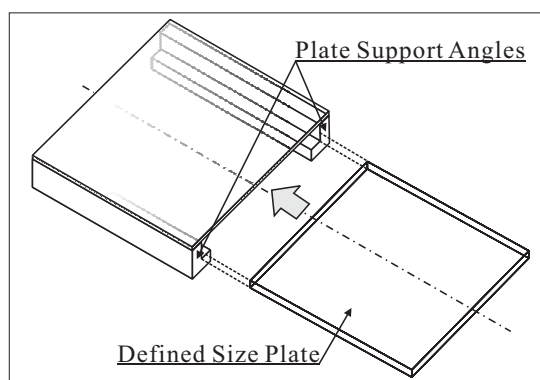


図 2.28: スライド式連結機構の概要

前者の具体的な手法としては1) 磁石モジュールと吸着面の距離を変化させて磁石モジュールの吸着力を大きくする。2) 磁石モジュールの他に電磁石など外部の機構を用いて吸着力を補う。などが考えられる。ただこれらの欠点は安全確保のために能動的な力が必要であるため、たとえば電力不足の時にこの過負荷防止機能が必要とされた場合にうまく動作しないことにある。これは永久磁石誘導法を採用するときにも問題となったことであり、この問題点を持ったものを採用することは永久磁石誘導法の利点を損なうことにも繋がるため、不採用となった。

一方後者の、磁石モジュールに吸着力以上の力が伝わらないようにする仕組みは産業安全研究所のフローラ [9] でも採用されている手法であり、その実績が証明されている上に、電力などの能動的な動力源を必要としないで実装できることが、永久磁石誘導法との相性がよいため、こちらを採用することとした。この実現方法として一番容易であるのが、定荷重バネを用いた方法である。機構としては吸着部と吊り下がり部とを連結する部分に定荷重バネを取り付けるというシンプルなものである。この定荷重バネはそのストロークにおけるどの位置においてもほぼ同じ引き込み力を示すというバネであり、このバネの引き込み力を磁石モジュールの総吸着力よりも小さくしておくことで、大きな負荷が加わった場合はバネが伸びてしまい、磁石モジュールへ過大な負荷を与えないという仕組みである。

2.3.5 物理支援型アクチュエーションユニットの必要機能と実現方法の考察

本節では物理支援型アクチュエーションユニットに求められる機能を整理し、その実現方法についての考察を行う。

まず物理支援型アクチュエーションユニットの必要機能をまとめると次のようになる。

- 伸縮機能

天井面から物理支援を行うためにはまず机上面や人間の高さまで動作部を下降させる必要がありそれを実現する機能である。

- 物体把持・搬送機能
動作位置まで下降したユニットが実際に対象物を操作する機能である。
- 環境認識機能
物理操作を行う以上、対象物の状態をモニタリングすることが必要である。また人間に対する物体操作の場合は安全確保のために稼動範囲内の障害物などの有無を認識する機能が必要となる。

今回作成するユニットはそれ自身が物体の操作を行わず伸縮機能と環境認識機能のみを備えたシンプルなものとし、以降ではこのユニットをクレーンユニットと呼ぶことにする。

伸縮機能

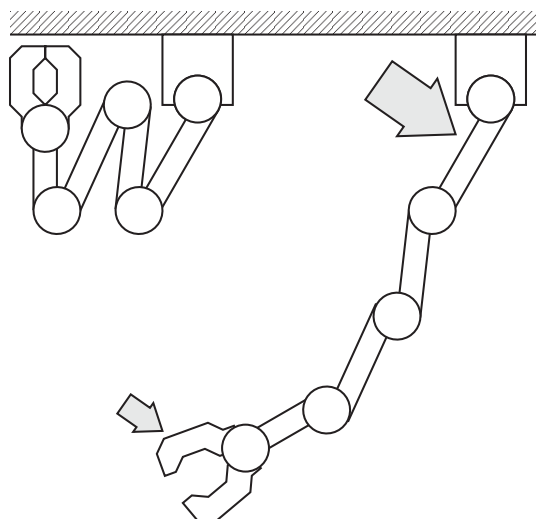


図 2.29: アーム型伸縮機構のスケッチ

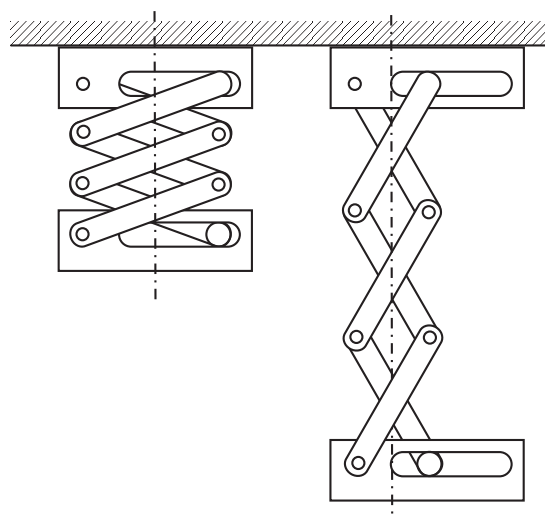


図 2.30: ジャバラ型伸縮機構のスケッチ

伸縮機能の実現方法としてはまず基本的な3つの機構を考察した。以降でそれぞれの利点と欠点と共に列挙する。

1. アーム型 図 2.29 のようにロボットアームと同じような関節機構を持ち各関節を最大限に曲げることで縮小状態を得るものである。
【利点】自由度が高いので構造によってはアームとしてのある程度の稼動範囲を確保できる。
【欠点】高さという1自由度を制御するために多関節（多自由度）を制御する必要がある。また移動ユニットと自由度が重複する可能性がある。
2. ワイヤクレーン型 図 2.31 のように一般的な荷物吊り下げ用のクレーンと同じ機構である。

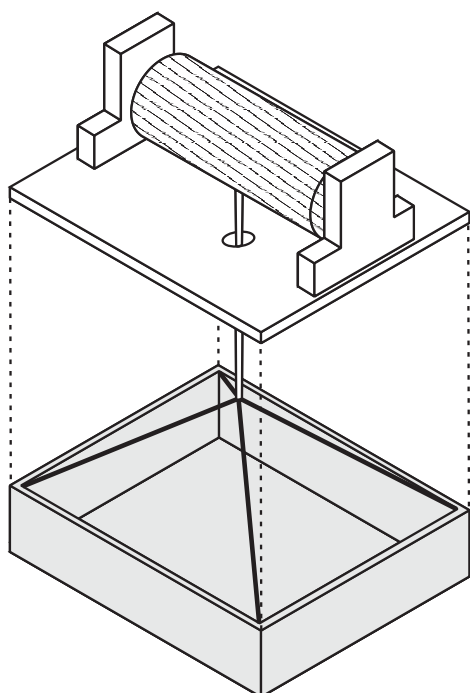


図 2.31: ワイヤクレーン型伸縮機構のスケッチ

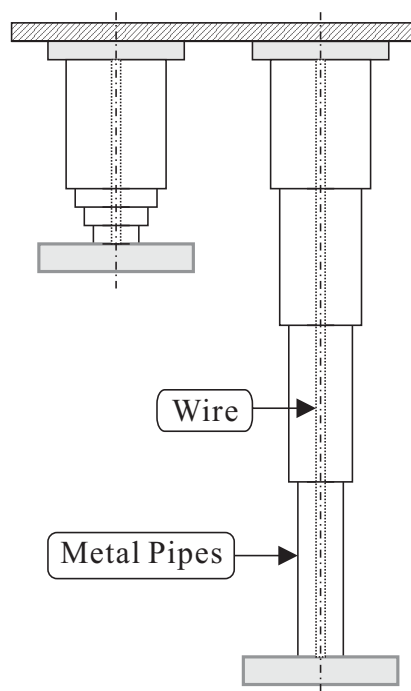


図 2.32: タケノコ型伸縮機構のスケッチ

【利点】機構がシンプルであり伸縮率が高い、また荷台の振動が巻き取り側に伝わりにくい

【欠点】荷台が揺れる可能性があり、作業部の位置決めをするのが困難である

3. ジャバラ型 図 2.30 のように自動車などに使われるジャッキアップ用の器具と同じ構造を利用したものである。

【利点】4 点の剛体で吊り下げ部を支えるので安定した上下運動が期待できる。

【欠点】伸縮率が低い、構造部品の重量が大きくなる。

以上の3つの方法のそれぞれの利点を生かし、問題点を解決する手法として次に示す "タケノコ型" を考案した。これは図 2.32 のように上下動の巻上げをするワイヤーの回りを径が段階的に異なる複数の金属パイプで覆ったもので、これによりワイヤークレーン型の伸縮機構のシンプルさとジャバラ型の安定した上下運動を持ち合わせることが可能な機構である。本ユニットの伸縮機能はこの "タケノコ型" を採用することとした。

環境認識機能

天井下の詳細な三次元モデルが得られると、人間の位置姿勢なども推測され、幅広い支援形態を目指すことができる。一方で詳細な3次元モデルを得るための機器はその導入コストの大きさが問題となる。レーザ方式の3次元デジタイザで5m四方程度の部屋をス

キャニングできる商品となると数千万円以上するので、各アクチュエータに実装するにはコストパフォーマンスが悪すぎる。

そこで今回は簡単な距離センサをアクチュエータに取り付けることで、必要最低限の人に対する安全の確保とアクチュエータの動作の保証のみを得ることにした。現在市販されている距離センサとして一般的なのが次の3つである。

- 超音波式 対象物の色や表面状態によらず比較的精度の良い測距を行うことができる。
- レーザ工学式 使用環境条件が整えばレンジが広くまた高精度の測定が行える。またサンプリングレートも高い。ただし対象物体の状態によりエラーが起きることがある。
- 磁気式（うず電流測定式） 高精度でサンプリングレートの高い測定が行えるが測定距離が10(mm)くらいまでと短い。

以上のようなそれぞれの特徴を考えて、今回は対象物が人間や様々な物体であり、表面状態が安定せず測定距離も数mは必要であるので超音波式の距離センサを採用することとした。

2.3.6 コントロールネットワークの必要機能と実現方法の考察

ネットワークの概略

まず本プラットフォームのコントロールネットワーク構造の概略を図 2.33 に示す。

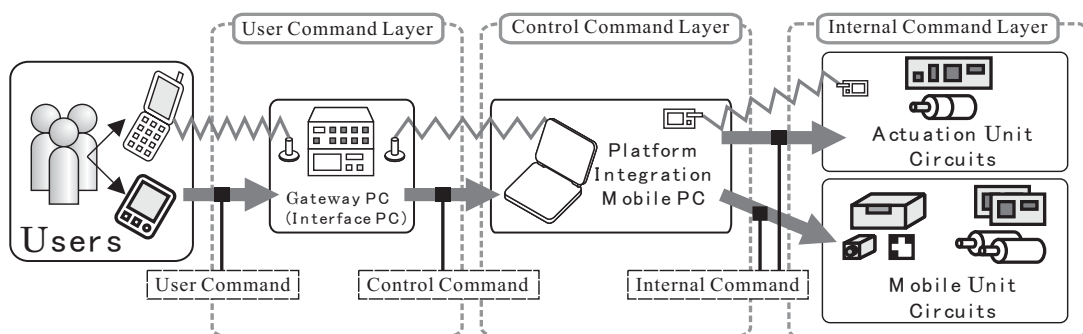


図 2.33: コントロールネットワークの概要

コントロールネットワークの情報伝達は次の3つの機能から構成される。

1. ユーザからの命令を受付・解釈する。
2. ユーザ命令の解釈の結果、各ユニットの動作を決定し伝達する。
3. 各ユニット上に伝達された命令に従って各動作部を動かし、内部の状態をレポートする。

コマンド階層・属性の整理

以上の機能を実現するために、まずコントロールネットワーク内で伝達されるデータの伝達範囲による分類を行う。

コマンドおよびその伝達層は大きくわけて次の3層に分類される

1. ユーザコマンド層
ユーザがシステムに送るシステム動作要求命令を受け取る層である。そのコマンドの内容は抽象的である。
2. コントロールコマンド層
ユーザコマンドを受け取り管理するサーバ or 端末が送るコマンド（移動命令、アクチュエータ動作命令 etc...）を受け取る層、つまり移動ユニット統合PCがそれに該当する。
3. インターナルコマンド層
移動ユニット統合PCが送るモータの動作命令など回路レベルの命令を受け取る層、つまりアクチュエーションユニット、移動ユニットの各回路が該当する。

各層のカテゴリは上であげた3つの機能とほぼ対応するように決定した。本研究では時間の都合上2,3のみを実装することを考える、つまり人間の抽象的なコマンド入力には対応しないこととした。

次にコマンド属性の分類について述べる。それぞれの階層におけるコマンドの属性を整理する利点は各ユニットで統一的なソフトウェアの開発が行えるということにある。今回の属性の分類は主に各ユニットを2つのフェーズ分けて動作させることを考えて行った。

1. 手動で動作コマンドを与え、ユニットの基本動作を確認するフェーズ
2. ユニットの基本動作を組み合わせで自動でユニットを動作させるフェーズ

これらの二つのフェーズを踏まえた上でコマンドの属性分類を以下のように行った。

- UnLock コマンド
内部ではオープンループの動作を行う。コマンド実行中でも他のコマンドの入力を受け付ける。
- Lock コマンド
内部で閉ループの制御動作を行う。Interrupt コマンドのみ受け付ける。またタスク完了後には完了通知を発する。
- Interrupt コマンド
全てのコマンドに対して優先権を持つ。このコマンドは受信され次第実行されなければならない。

UnLock コマンドが基本動作の確認フェーズ、Lock コマンドが自動動作をさせるフェーズに対応している。Interrupt コマンドは動作を抑止するためのものであり、UnLock, Lock コマンド両方に機能する。

2.3.7 ロボット動作用天井の必要機能と実現方法の考察

今回ロボット動作用天井に求められる機能は次の4つである。

- 動作するロボット全体の重量を安全に支える
- 吸着ユニットおよび移動ユニットがスムーズに移動できる平面を提供する
- 天井裏でのロボットの動作の様子が人間によって確認できる
- 既に天井に設置されている照明機器を利用できる

以上の4条件を満たすために、RR3内に既存のケーブル配線用のダクトを利用し、それにぶら下がる天井フレームをステンレスと鉄材によって作ることで剛性の強い天井とする、また透明強化ガラスを天井平面材として利用することによって既存の照明を利用できる状態のまま、天井下面からもロボットの動作が観察できる天井平面を実現することとした。

第3章

天井移動ロボットプラットフォームの設計と製作

本章では天井移動ロボットプラットフォームの設計と製作について、2.3節で述べた各ユニットの必要機能と対応させてそれぞれの実装を述べる。

3.1 吸着ユニットの実装

前章でも述べたように吸着ユニットは4つの磁石モジュールから構成される。本章ではこの磁石モジュールの実装について述べる。磁石モジュールの実装は大きく次の5つのステップからなる。

1. 基本設計（磁石・ヨーク形状の仮決め）
2. 磁気回路シミュレーションソフトによる吸着力の見積り確認
3. 詳細設計（磁石・ヨーク詳細形状およびその他部品の設計）
4. 製作（加工・組立）
5. 吸着力測定

ここでヨークとは磁気回路において磁路を形成するために配置する鉄などの強磁性体のことを指す。また以上の5つのステップを一通り行うことを1フェーズと呼ぶことにする。今回の磁石モジュールの実装は2フェーズを要した。最初のフェーズは第1ステップの基本設計の動作状況および、第2ステップの磁気回路シミュレーションソフトの正確さを確認する1号機。そして次のフェーズが1号機で得られた基本設計の動作状況およびシミュレーション誤差の大きさに関する情報を利用し、実際にロボットに組み込むことを念頭において作成する2号機である。以降でそれぞれのフェーズについて詳細を述べる。

3.1.1 天井吸着機能の実装 1 (磁石モジュール 1号機的设计・製作と性能評価)

磁石モジュールの1号機は基本機能の確認および使用した磁気回路シミュレーションソフトの誤差の見積りを行うために製作した。

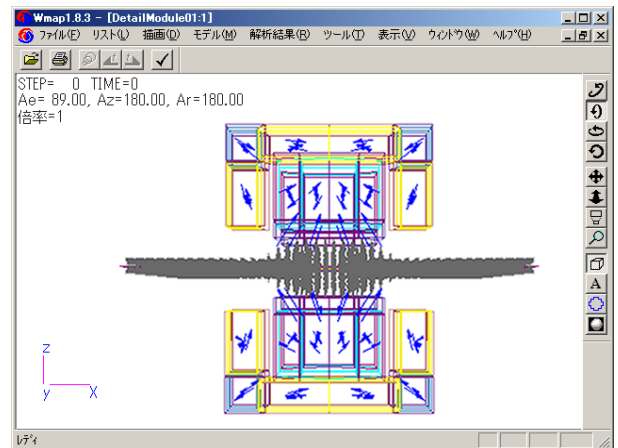
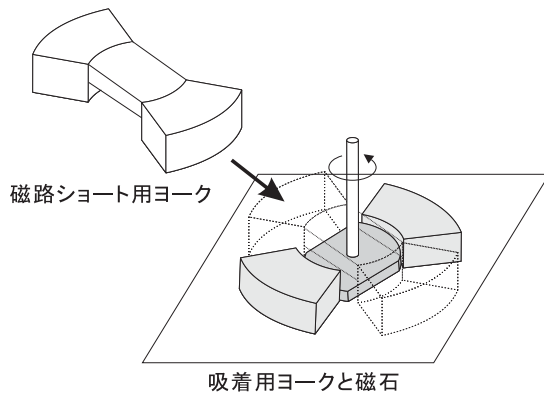


図 3.1: 磁石モジュール 1号機の簡易パース図 図 3.2: “ELF/MAGIC” によるシミュレーション結果の視覚化

磁石モジュール 1号機で使用した磁石は住友特殊金属(株)製の希土類磁石”NEOMAX-44H”である。また吸着および減磁の切替は図 3.1 に示すように、磁石を 90 度ずつ回転させて、誘導用ヨークまたは磁路ショート用ヨークと対向させることによって、吸着・脱着を切り替える機構となっている。今回吸着力のシミュレートのために使用したソフトは(株)エルフの”ELF/MAGIC”というソフトである。このソフトウェアの特徴を以下に示す。

- モーメント法、表面磁荷法、表面電流法、ネットワーク法を改良・統合し、独自に開発した積分要素法により、高速・高精度な解析を実現
- 空間磁場は、要素の磁束密度分布とコイル電流から直接積分要素法によって求める
- 磁性体・永久磁石・コイルなどの形状は 3次元、2次元、軸対称のものが取り扱える
- 磁性体内部の磁束密度・空間磁場・磁場による力とトルクの計算ができる
- 磁場設計において対称条件・周期境界条件が扱える

このソフトはシミュレーション結果を数値として得られるだけでなく図 3.2 のように磁場の向き、吸着力の方向などをベクトル場として確認することが可能である。1号機のシミュレーションにおいては磁石本体と吸着用ヨークをモデリングしてシミュレーションを行い、磁石モジュール間ギャップが 10(mm) ある状態において 5(kgf) ほどの吸着力を示すように磁石およびヨークを設計した。以上のように基本設計とシミュレーションを行っ

た磁石モジュールを実際に作成した。製作した磁石モジュール1号機を図3.3,3.4に示す。この磁石モジュールは同じもの2つを天井面をはさんで対向させて使用することを想定している。また磁石の回転には比較的大きな力が必要となることが予想されたので回転軸にウォーム・ギアによる減速機を磁石モジュールの上面に設置した。ウォームギアを磁石モジュールの上面に設置したのはウォームギアが破損などを起こしても磁石本体とは関係なく交換可能であると考えたからである。

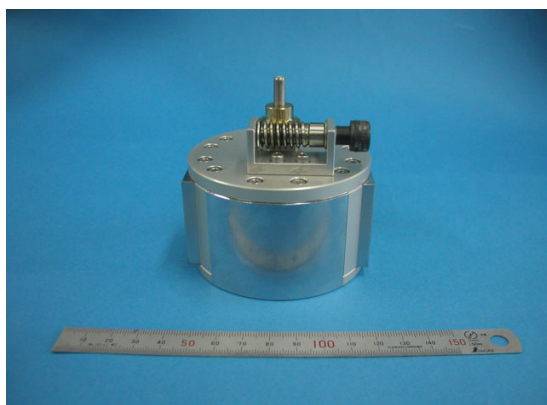


図 3.3: 磁石モジュール1号機

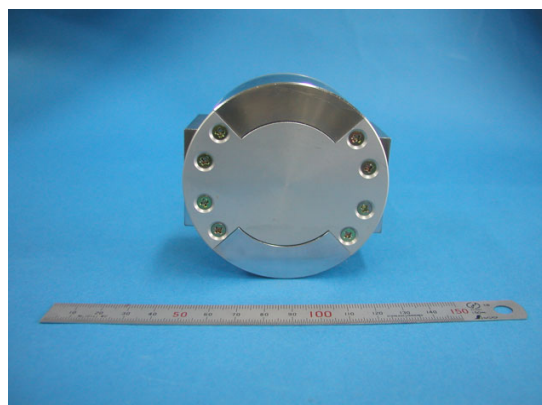


図 3.4: 磁石モジュール1号機（下面）

この1号機を図3.5の示すような測定スタンドの上に取り付け、内蔵されたロードセル（図3.6）に加わる力をモニタすることで磁石の吸着力を測定した。なおスタンドを垂直に立てて使用しているのは直進支持用に用いているリニアブッシュの摩擦を減少させるためである。図3.7にその結果を示す。しかしこの磁石モジュール1号機はシミュレーションを磁石および吸着ヨークのみで設計を行ったため、磁気回路のシミュレーションが正しく行われておらず、結果としてわずかな吸着力（10(mm)の間隔で2.0(kgf)）しか得ることができなかった。なお図3.7のシミュレーション値は磁石、吸着用ヨークに加えてショート用ヨークを加えた後の結果である。またモジュール間距離20(mm)においてシミュレーション値と実測値の上下関係が逆転しているのは、このギャップにおいてはあまりに漏れ磁束が大きいいためシミュレーションが正しく行われなかったことが原因と推測される。

3.1.2 天井吸着機能の実装2（磁石モジュール1号機の改良と性能評価）

1号機では十分な吸着力が得られなかったため、新たに吸着用ヨークを設計しなおし、図3.8,3.9に示す磁石モジュール1号機改を作成した。この二つのモジュールのヨーク形状の差異を図3.10に示す。

磁石モジュール1号機がほとんど吸着力を示さなかったのは誘導用ヨークが必要以上に大きく高く作られたため、誘導用ヨークの上端で磁場がショート用ヨーク側へと漏れていたのが原因であると考えられる。改良の結果、1号機改では誘導用ヨークの背を低くしたため漏れが少なくなった。この磁石モジュール1号機改も1号機と同様に吸着力の測定を行った。図3.11にその結果を示す。このグラフより測定点7点においてシミュレータの誤差は30%程度であることが分かった。この30%という値は、一般的な永久磁石の磁気

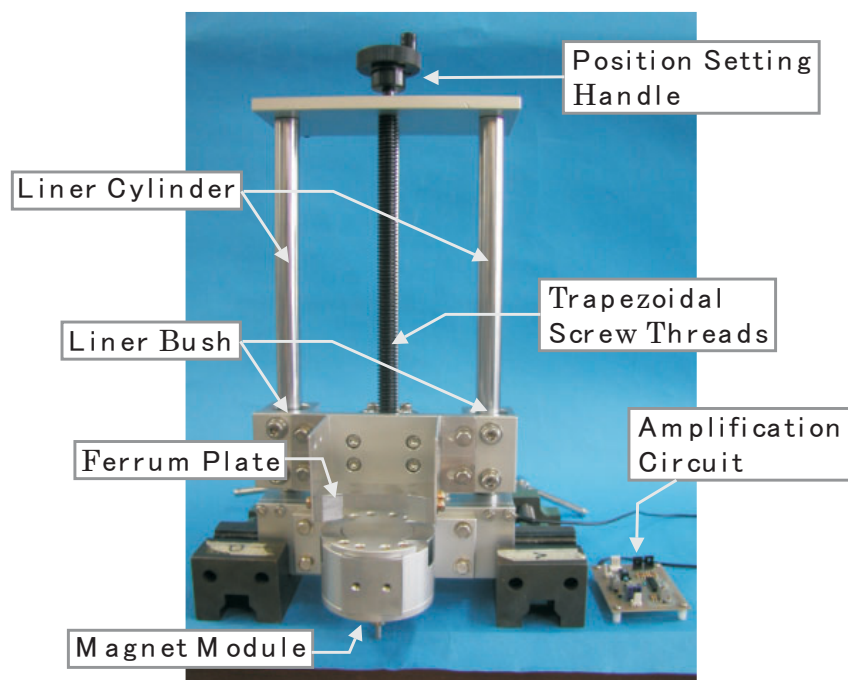


図 3.5: 磁石モジュールの吸着力を測定するスタンド（この写真は磁石モジュールと金属片を対向させて吸着力を測定している様子である。）

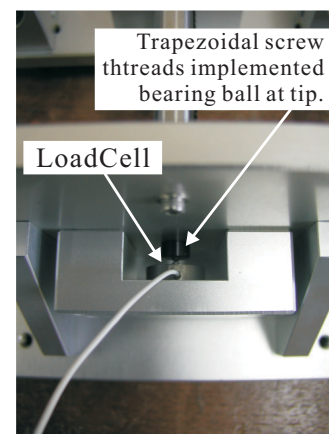


図 3.6: 測定スタンド内蔵のロードセル

回路がサブミリオーダの空隙で使用される中、今回の使用法では数mm以上のギャップを想定しているので妥当な値と思われる。

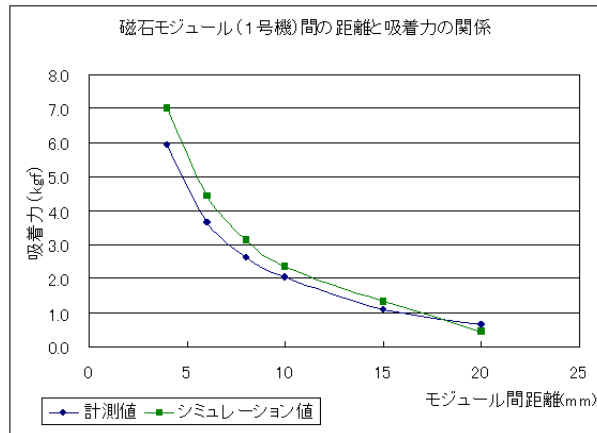


図 3.7: 磁石モジュール 1 号機のシミュレーション結果および実測値の比較

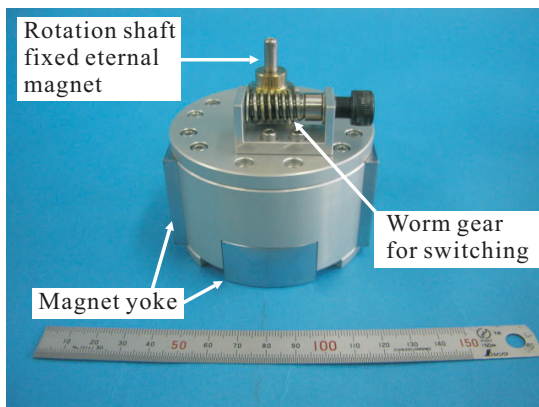


図 3.8: 磁石モジュール 1 号機改良版

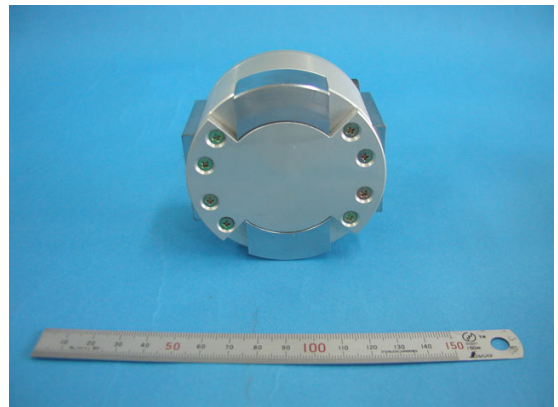


図 3.9: 磁石モジュール 1 号機改良版 (下面)

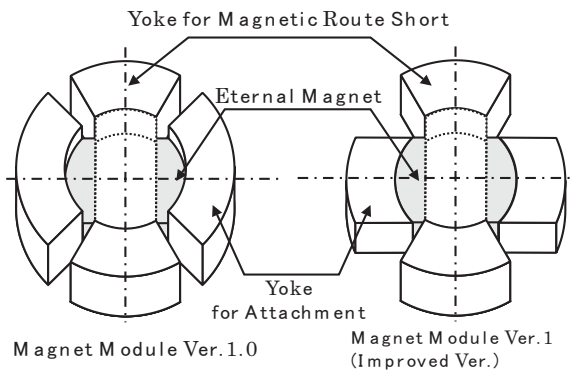


図 3.10: 1 号機から 1 号機改への変更点

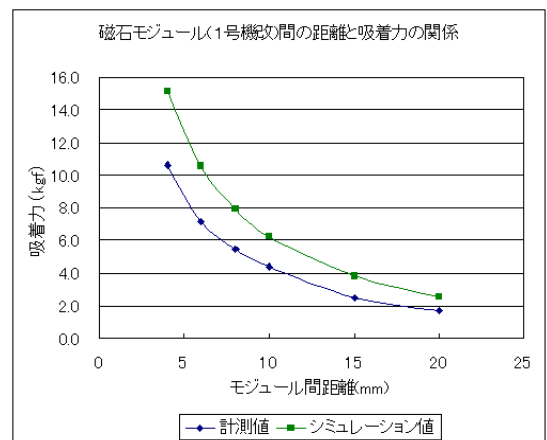


図 3.11: 磁石モジュール 1 号機改のシミュレーション結果および実測値の比較

3.1.3 天井吸着機能の実装3（磁石モジュール2号機の製作と性能評価）

磁石モジュール1号機および1号機改の作成により、基本機能の確認およびシミュレーションソフトの誤差の見積りができたので、実際に移動ロボットへの実装を考えた2号機の作成へと移行した。まず1号機の段階では曖昧だった吸着力の仕様および機能を表3.1のように設定した。

表 3.1: 磁石モジュール2号機の要求仕様・機能

吸着力	10(mm)のモジュール間ギャップにおいて7.5(kgf)
吸着&脱着	『吸着-保持-脱着』の3段階の切替式
付加機能	天井面と一定の間隔を保持する。 天井面との摩擦を小さくする。

なおこの要求仕様は実際にロボットを作成する上での重さの割り振りを考慮しながら行った。また第2ステップの磁石・ヨーク形状の仮決めにおいては実際の吸着力がシミュレーションの値より30%下回るとして、30%分大きなシミュレーション値を示すように設計を行った。図3.12に磁石モジュール2号機のパース図を図3.13,3.14に実際に作成した磁石モジュール2号機の外観を示す。2号機で使用した磁石は信越化学工業(株)のネオジウム系マグネット”N45H”である。1号機で使用した磁石とほぼ同じスペックであるが、2号機は量産化を考え位置合わせ用の溝を磁石側に加工することを考えたため、加工技術の点から信越化学工業(株)に磁石の作成を依頼した。2号機では基本的な吸着・脱着の仕組みは1号機と同じまま天井面と摩擦を減らしつつ一定の距離を保つボールキャストが内蔵され、また1号機ではウォーム・ギアで軸を回転させていたが、2号機では3段階のみの切替えを実装すればよいので、一般的なレンチを上から押し付けながら回すと軸を回転させることができる構造とした。

2号機に関しても1号機と同様に吸着力の測定を行った。その結果を図3.15に掲載する。

シミュレーションと実測値との差は1号機の時とほぼ同じ30%程度であり2号機の磁石・ヨーク設計が正しく行われたことを裏づけしている。また要求仕様の「ギャップ10(mm)で7.5(kgf)」の吸着力という条件を満たしている。

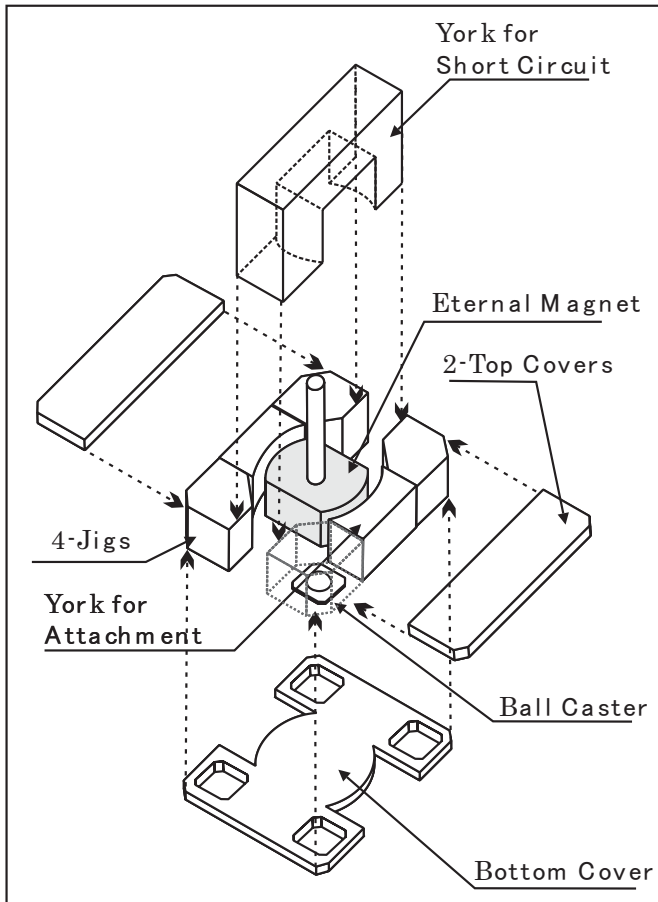


図 3.12: 磁石モジュール 2 号機のパース図

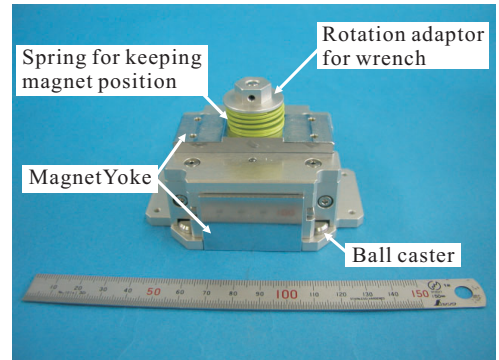


図 3.13: 磁石モジュール 2 号機

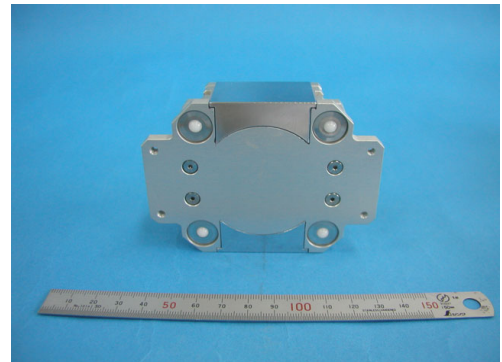


図 3.14: 磁石モジュール 2 号機 (下面ボールキャスタ)

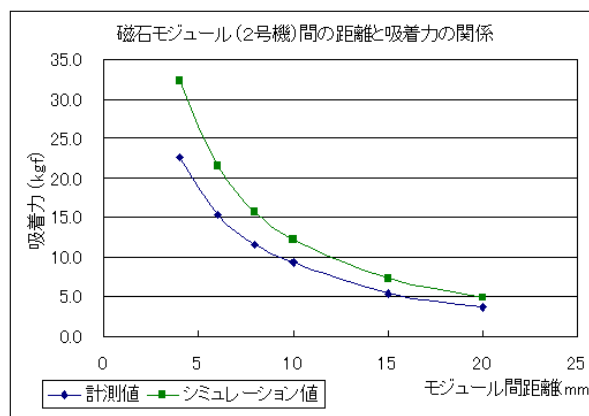


図 3.15: 磁石モジュール 2 号機のシミュレーション結果および実測値の比較

3.2 移動ユニットの実装

この章では2.3.3で挙げた移動ユニットの必要機能である、移動機能および自己位置認識機能の実装について詳しく述べる。

3.2.1 移動機能の実装

本節では移動機能の実装について以下の順番で述べる。

1. 移動機能の基本仕様仕様の整理
2. 機構設計
3. 動力計算およびモータの選定
4. 移動機能の実装

移動機能の基本仕様仕様の整理

この台車の運搬機能に関する基本仕様仕様を表3.2にまとめておく。

表 3.2: 移動ユニットの移動機能における基本仕様仕様

	機能項目	要求仕様
1	最小回転半径	0(mm)
2	最大搭載荷重	30(kg)
3	移動速度	0~100(mm/sec)

1つめの仕様はつまりその場旋回が可能なことであり、これは移動ユニットの旋回自体が下部にぶら下がるアクチュエーションユニットの1自由度となることを考えている。また、要求仕様の2つめの最大搭載荷重30(kg)は、自重をおよそ10(kg)、下部にぶら下がるユニットおよび運搬物の合計荷重を20(kg)と仮定して設定した。また3つめの移動速度はRR3ですでに稼働済みの移動台車の速度を参考にその速度が十分であると考え移動台車の最大移動速度を移動速度の上限として設定をした。

機構設計

移動ユニットの移動機構部の機構図を図3.16に示す。

まず要求仕様の1つめを満たすためには動力の最終出力となるタイヤを2つ同軸上にならんで設置しておく必要がある。よって、本移動ユニットではタイヤ及び出力軸を機体の中央に二つ対称に並べた。タイヤには(株)ミスミから販売されているウレタンローラを特注加工したもの(【特注型番】%FCSP-RLSC-AMUT3-NO.01-06088:直径80mm)

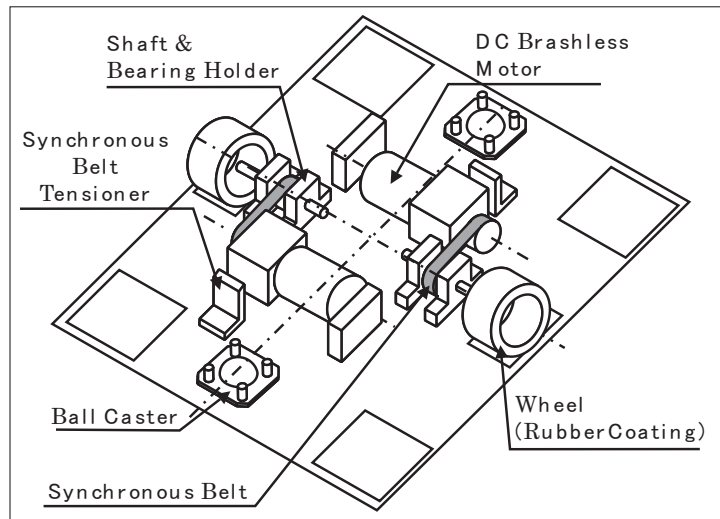


図 3.16: 移動ユニットの移動機構部

を採用した。動力源には速度制御用コントローラが付属していることと値段の安さを考慮し、オリエントアルモータ社製のブラシレスDCモータシリーズを採用することとし、車軸と平行な異なる軸上にモータを配置するために動力伝達はハイトルクタイミングベルトとタイミングプーリを利用している。またタイミングベルトのテンションを調節できるようにタイミングベルトテンショナを設置する。またオリエントアルモータ社製のブラシレスモータシリーズは回転に伴い方形パルスを出力するようになっているため今回は回転速度および回転量計測のためのタコジェネレータやエンコーダは搭載していない。また車体の前後には図 3.17 に示すように2つのボールキャスタがバネで支えられた台座に取り付けてあり、路面の凹凸をある程度吸収する形で自重を支えるようになっている。

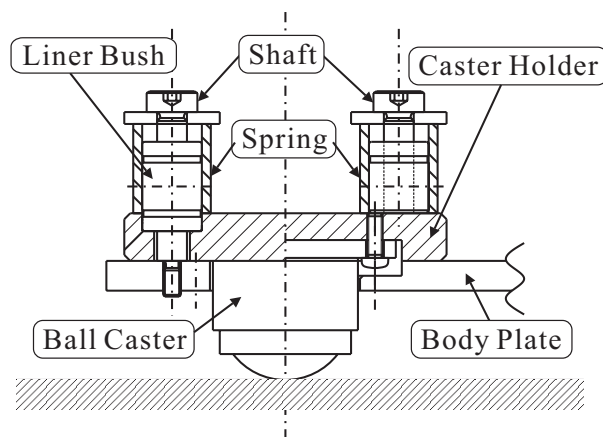


図 3.17: ボールキャスタによる路面の凹凸吸収機構

動力計算およびモータの選定

動力計算およびDCモータの選定は以下の手順で行われた。

1. 必要動力の計算
2. 車軸回転数の計算
3. モータ軸の必要トルク計算
4. モータの型番選定

以降で実際の計算について説明をする。

まず、図 3.18 に移動ユニットの車輛モデルを示す。

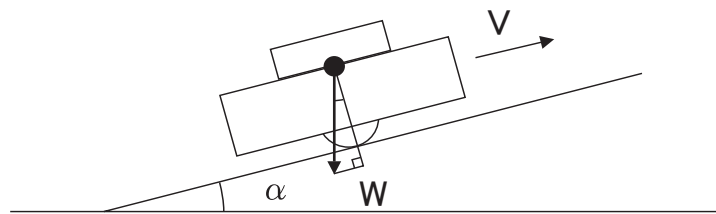


図 3.18: 移動ユニットの車輛モデル

(1) 必要動力の計算

必要動力は式 3.1 により計算される。表 3.3 に図 3.18 および式 3.1 中の各変数の説明を記す。

$$P = 9.8 \times W \times (\sin \alpha + \mu \cos \alpha) \times V / \eta \quad (3.1)$$

表 3.3: 式 3.1 中の変数の説明

文字	内容	単位	本移動ユニットにおける値
P:	必要モータ出力 (二つのモータの合計)	Watt	—
W:	台車自重 + 荷重質量	kg	30 (kg)
V:	車速	m/s	0.10 (m/s)
μ :	走行抵抗係数	なし	0.20 (推定)
η :	機械損失 (動力伝達による)	なし	0.70 (推定)
α :	最大傾斜角度	度	10°

ここで速度は基本仕様最大の移動速度を用い、最大傾斜速度は天井面の施工および撓みを考慮して見当をつけた値である。そして μ と η は「卒業論文 - 生活環境ネットワー

クルームにおける移動台車システムの構築に関する研究」[18]をもとに、推定した値である。またここではモータは2つとも同じように直進方向に回るとし、タイヤのすべりはないものと仮定している。

式 3.1 に台車の実際の値（表 3.3 右参照）を代入すると、式 3.2 のようになり、必要動力 P は 15.57(Watt) と計算される。

$$15.57(W) = 9.8 \times 30 \times (\sin 10^\circ + 0.2 \cos 10^\circ) \times 0.10/0.7 \quad (3.2)$$

(2) 車軸回転数の計算

移動ユニットの基本仕様の最大移動速度を満たすように車軸の回転数を決定する。車軸の回転数は式 3.3 によって計算される。式 3.3 中の変数の内容を表 3.4 に示す。ここでタイヤ直径とは今回採用することとしたローラの直径である。計算の車軸回転数はおよそ 25(rpm) となる。

$$N = \frac{V \times 60}{\pi D \times 10^{-3}} = \frac{0.1 \times 60}{3.14 \times 80 \times 10^{-3}} = 23.88... \simeq 25 \quad (3.3)$$

表 3.4: 式 3.3 中の変数の説明

文字	内容	単位	実際の値
N:	車軸回転数	rpm	—
V:	車速	m/s	0.1(m/s)
D:	タイヤ直径	mm	80(mm)

(3) ギアヘッド軸の必要トルク計算

タイミングプーリを同じものを使用することによって、台車の高さ方向の設計をシンプルにするためタイミングベルトの減速比を 1 : 1 とする。トルクは式 3.4 によって計算される。ここでの各変数は式 3.1 と同様のものと表 3.5 に示されたものである。この式に値を代入すると、式 3.5 のように計算され、ギアヘッド軸の必要トルクはおよそ 6(Nm) となる。

$$T_L = \frac{9.8 \times W \times (\sin \alpha + \mu \cos \alpha)}{\eta} \times \frac{D \times 10^{-3}}{2} \quad (3.4)$$

$$T_L = \frac{P}{V} \times \frac{D \times 10^{-3}}{2} = \frac{15.57}{0.1} \times \frac{80 \times 10^{-3}}{2} = 6.226(Nm) \quad (3.5)$$

(4) モータ選定

この章で計算してきたモータの条件をアプリケーションデータとして表 3.19 にまとめる。

電源の 24V は以降で述べる F A 用 2 次元バーコードリーダに供給する電源により規定されたものである。モータの選定においては、各アプリケーションデータに対して、次のような条件を満たしている必要がある。

表 3.5: 式 3.4 中の変数の説明

文字	内容	単位	実際の値
T_L :	ギアヘッド軸必要トルク	Nm	—
P:	必要動力	Watt	15.57(W)
D:	タイヤ直径	mm	80(mm)

図 3.19: ブラシレス DC モータアプリケーションデータ (両方のモータで)

出力動力	約 15(W)
出力トルク	約 6(Nm)
モータ軸回転数	約 25(rpm)
供給電圧	24(V)
軸負荷 (半径方向)	ほぼ 0(N)
軸負荷 (軸方向)	ほぼ 0(N)

図 3.20: ブラシレス DC モータおよびギアヘッドの必要仕様 (片方のモータのみ)

出力動力	15~22.5(Watt)
ギア出力回転数	25(rpm)
出力トルク	3(Nm)

1. 出力動力は必要動力の 2 ~ 3 倍
2. 必要回転数は無負荷回転数の 1/2 以上
3. 必要トルクはギアヘッドの許容軸トルクを越えない

よって、必要とされるモータの基本仕様は表 3.20 のようになる。

表 3.20 の仕様を満たす、モータおよびギアヘッドのペアを選んだところオリエンタルモータ社製ブラシレス DC モータ”AXH230K-100” が採用された。その写真を図 3.21 に示し、そのカタログデータを表 3.22 に示す。

各機構部の実装

以上のように設計を行った移動機能の各機構部の実装を行った。図 3.23,3.24,3.25,3.26 に実装された各機構部の写真を掲載する。

図 3.23 はモータ側のタイミングプーリと車軸側のタイミングプーリの連結の様子を示し、図 3.24 は使用した特注ウレタンローラの写真である。図 3.25 はタイミングベルトテンション調整用の L 字金具の実装の様子である。最後に図 3.26 は図 3.17 に示したボールキャストの機構部の実装の様子を示した写真である。



図 3.21: 採用したブラシレスDCモータ

図 3.22: 採用したブラシレスDCモータ及びギアヘッドのカタログデータ

製品名	ブラシレスDCモータ
型番	AXH230K-100
定格電圧	DC24(V)±10%
定格入力電流	2.1(A)
最大入力電流	3.5(A)
定格出力	30(Watt)
ギアヘッド減速比	1:100
ギア軸最高回転数	30(rpm)
速度制御範囲回転数	1~30(rpm)
許容トルク	6(Nm)

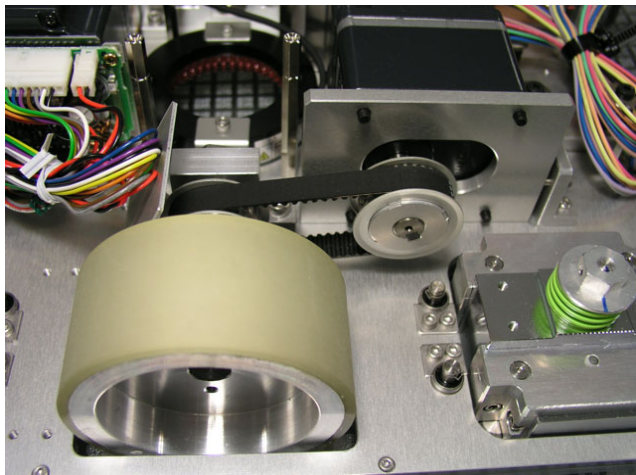


図 3.23: 実装したタイミングベルト連結部

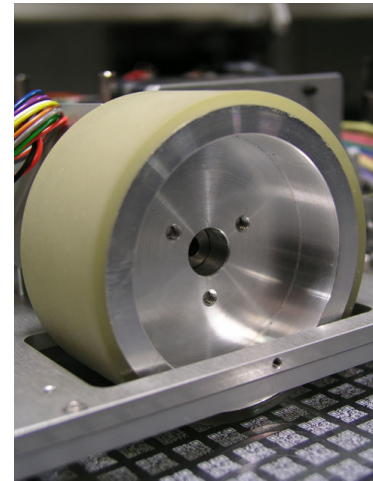


図 3.24: 実装したローラの側面図

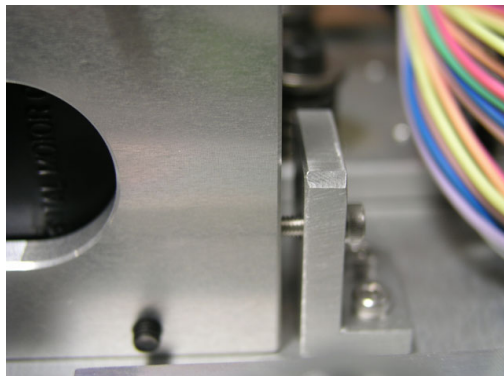


図 3.25: 実装したタイミングベルトテンショナ

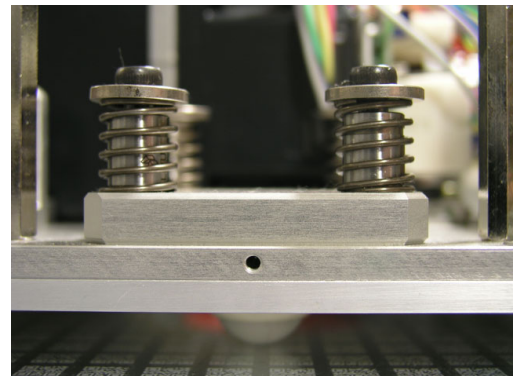


図 3.26: 実装したボールキャスタ機構部

3.2.2 自己位置認識機能の実装

2.3.3 節で述べたように、今回の天井ロボットでは環境に位置情報を2次元バーコードによってマーカとして記述し、それぞれのマーカを各ロボットが読み取ることによって位置計測を行うこととした。本章ではまず、使用したコードの仕様や読み取り方法について述べ、次に読み取られた情報からロボットの位置・角度を計算する手法について述べる。

2次元コードと情報の読み込み

”ロボットの位置の推定”という用途を考えた場合、本来はその目的に最適なマーカを模索する必要があるのだが今回は時間の都合上、既に規格化されている2次元コードを利用した。今回採用したコードは(株)デンソーウェーブが開発・規格化した「QRコード」(図3.27参照)である。このコードを採用した理由は読み取り速度が高速であり、またその読み取りの手順がロボットの位置を検出する手法との相性が良いと判断したためである。QRコードはコードの切り出しに3つのシンボルを用い、まず読み取るべきコードの位置を決定する。このコードの位置の検出方法がロボットの位置推定にそのまま利用できる考えたのである。本ユニットではコードの読み取りには(株)デンソーウェーブ製のFA用2次元コードリーダーの”QD20”(図3.28)のファームウェアを改造したものを使用した。表3.6に”QD20”の基本仕様を示す。

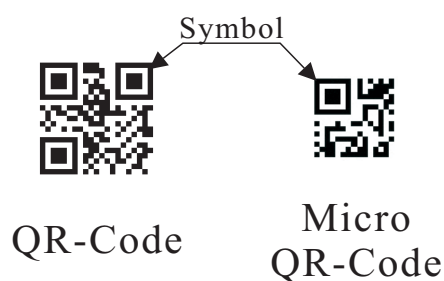


図 3.27: QR コードとマイクロ QR コードのサンプル



図 3.28: 2次元コードリーダー ”Q D 2 0 ”

なお改造後のコードリーダーは図3.29のように読み取ったコード内のデータにCCD内のコードの位置を4つの角の座標という形で付加して送ってくるようになっている。このコードデータおよびコードの位置データからロボットの位置・方向を計算するのである。

表 3.6: 使用した2次元コードリーダーの基本仕様

読み取り部	読み取りコード (2次元)	QRコード(モデル1,2), マイクロQRコード, DataMatrix(ECC200,PDF417)
	読み取りコード (1次元)	UPC-A/E,EAN-13/8,CODABAR(NW-7), CODE39, Interleaved 2 of 5, CODE128(EAN-128)
	スキュー角	360°
	カメラ	専用VGA/1線式
機能	画像メモリ	最大10画像(グレー画像/2値画像)
	モニタ表示	Gray/2値画像, 設定メニュー, 読み取り結果
操作部	モニタ出力	NTSC/EIA
	コンソール入力	PS/2 マウスインターフェイス
外部入出力	入力	トリガ, モード1, モード2
	出力	OK,NG, 外部照明同期信号
通信I/F	方式	RS-232C
	転送速度	115.2 (kbps,MAX)
	コネクタ	D-sub9 ピンオス
電源	定格電圧	DC24 (V), 1 (A)
環境条件	使用温度範囲	0 ~ 50 (°C)
	使用湿度範囲	10 ~ 85 (%RH) 結露・結氷ないこと
重量		510 (g)

2次元コードマトリクス

今回は2次元コードを行列状に並べ環境中にコードを散在させることとした。これを以降では2次元コードマトリクスと呼ぶことにする。今回用意したコードマトリクスには各コードに”X0007Y0023”のように、原点からそのコードがX、Y方向に何個目のコードかという情報が含まれている。使用したQRコードの仕様を表3.30に掲載する。

1枚の2次元コードマトリクスのシートを製作の都合上500mm×500mmとし、その中に10mmピッチで $50 \times 50 = 2,500$ 個のコードを印刷する。これらのシートを移動領域に敷き詰めることによって、ロボットの位置推定を可能にするのだが、ロボットは読み込んだコードのデータの変化を観察することで、跨いだシートの枚数をカウントして自分がどのシートの上にいるかを記憶する必要がある。つまりコードデータが大きく変化した場合シートを跨いだと認識するのである。またロボット起動後最初にどのシートにいるかはユーザが情報を与える必要がある。

コード情報からの位置・角度推定計算

本節ではコード情報からの位置・角度推定計算方法について述べる。まず最初に角度の推定について述べ、その次に位置の推定について述べる。

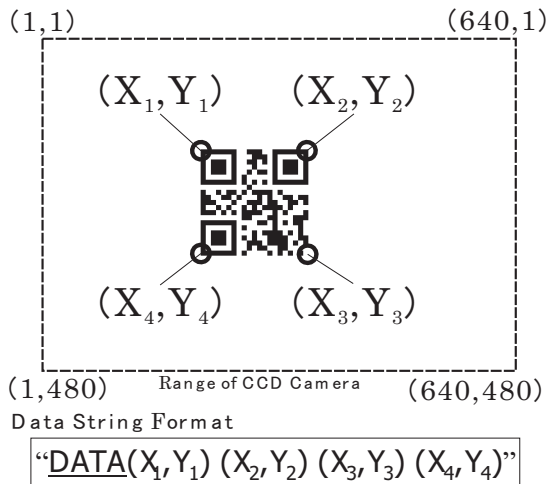


図 3.30: 2次元バーコードマトリクスに使用したコードの仕様

QRコードモデル	モデル2
誤り訂正レベル	M
バージョン	1
セルサイズ	8 Pixels
コードサイズ	7.112mm 四方

図 3.29: コードリーダーより送られるデータのフォーマット

角度推定

推定角度は次の手順で計算される。

1. コードの向きによる場合分け
2. コードの各辺の傾きを求める
3. 4辺の傾きより、コードの向きの平均値を求める

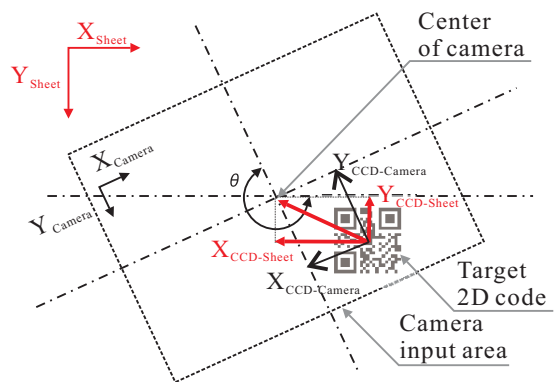
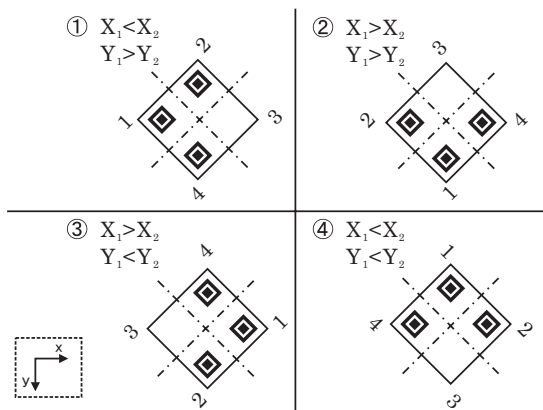


図 3.32: コード読み取りにおけるカメラ座標系とシート座標系の関係

図 3.31: 2次元コードの向きによる場合分け

まずコードはその向きによって図 3.31 のように 4 つの場合に分けられる。それぞれは角 1 および角 2 の座標の関係によって分類される。次に式 3.6 によって各辺の傾きを求める。

$$k_{ij} = \frac{Y_j - Y_i}{X_j - X_i}, \{i, j = (1, 2), (2, 3), (3, 4), (4, 1)\} \tag{3.6}$$

ここで i, j はコード角の番号である。また X_i, X_j は各 i の x 座標および y 座標の値である。そして k_{12}, k_{34} および k_{23}, k_{41} の逆数の平均値を求める（この値を k_{ave} とする）この値よりロボットの角度方向は式 3.7 のように求められる。

$$\begin{aligned}\theta &= -\arctan(k_{ave}) + \theta_{Offset} - (\pi/2), \\ \theta_{Offset} &= 0, (X_1 < X_2, Y_1 > Y_2) \\ &= \pi, (X_1 > X_2, Y_1 > Y_2) \\ &= \pi, (X_1 > X_2, Y_1 < Y_2) \\ &= 0, (X_1 < X_2, Y_1 < Y_2)\end{aligned}\quad (3.7)$$

位置推定

推定位置は X 座標の場合、式 3.8（ Y についても同様の計算）によって計算される。単位は全て“mm”である。

$$\begin{aligned}X_{position} &= (SheetSize \times XSheetOffset) \\ &\quad + (CodePitch \times XCodeData) \\ &\quad + ((CodeSize \times XPosition_{CCD-Sheet}) / CodeSize_{CCD})\end{aligned}\quad (3.8)$$

ここで $SheetSize$ とは 2 次元バーコードを印刷したシートの大きさ 500mm、 $XSheetOffset$ は今 X 方向に何枚目のシートにいるかを示す変数、 $CodePitch$ は配置した 2 次元コードの間隔で 10mm、 $XcodeData$ とはコードに書き込まれた“X00??Y00??”の“??”の部分に相当し、シートの上で何番目のデータであるかを示す変数。 $CodeSize$ は印字されたコードの大きさで 7.112mm、 $Xposition_{CCD}$ とはカメラ画像上のコード中心の（カメラ座標系ではなく、シートの座標系における）位置、 $CodeSize_{CCD-Sheet}$ はカメラ画像上のコードの大きさが何ピクセルかを示す変数である。

ここでカメラ座標系でのコード中心の位置をシートの座標系に変換する計算について述べる。まずカメラ座標系とシート座標系の関係を図 3.32 に示す。この図が示すようにシート座標系のコード中心の位置を得るためにはカメラ座標系のそれをカメラの傾き分だけ回転させればよい。このことを式に示すと式 3.9, 3.10 のようになる。

$$\begin{aligned}XPosition_{CCD-Sheet} &= XPosition_{CCD-Camera} \times \cos\left(\frac{3}{2}\pi - \theta\right) + \\ &\quad YPosition_{CCD-Camera} \times \sin\left(\frac{3}{2}\pi - \theta\right)\end{aligned}\quad (3.9)$$

$$\begin{aligned}YPosition_{CCD-Sheet} &= -XPosition_{CCD-Camera} \times \sin\left(\frac{3}{2}\pi - \theta\right) + \\ &\quad YPosition_{CCD-Camera} \times \cos\left(\frac{3}{2}\pi - \theta\right)\end{aligned}\quad (3.10)$$

以上をまとめると、まずどのシートにいるかを考慮し、次にどのコードを読み取ってるかを調べ、最後にそのコードがカメラのどの位置に写っているかを考えることによって現在の位置を計算している。

3.2.3 移動ユニット全体設計および組み上げ

2.3.3節で述べたように、移動ユニットは2つのモータおよびタイヤを持つ2駆動輪対向型の移動車両で、4つの磁石モジュール、2次元コードを読み取るためのカメラ・照明およびコードリーダ制御ボックス、ネットワーク越しで動作命令を受け取りモータ等をコントロールする統合PC、電源ボックス搭載する。

それぞれの部品の配置は図3.33に示すスケッチの通りである。

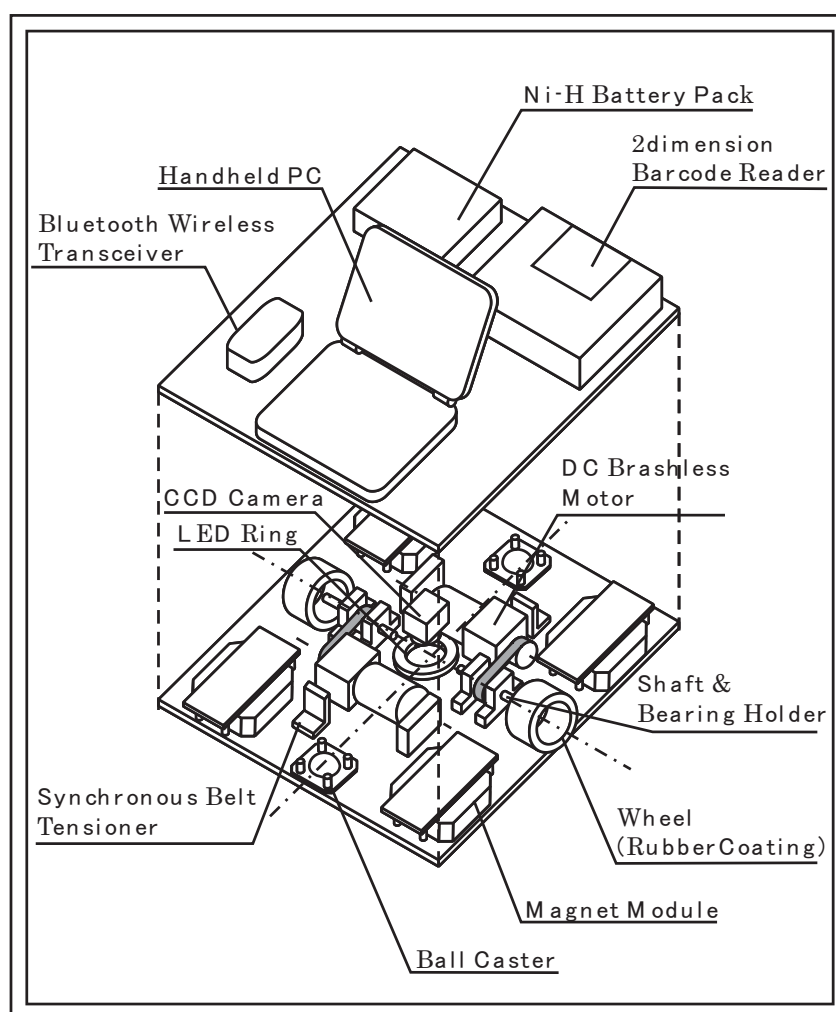


図 3.33: 移動ユニットのパーツ図

移動ユニット側の吸着ユニットはボールキャストで天井上表面に接地しており、本体とは図3.34のようにリニアプッシュで結合されている。これにより吸着ユニットは移動ユニットの傾き等と関係なく天井板と一定の距離を保つことができるようになっている。表3.7に組み上げた移動ユニットの基本仕様をまとめる。また組み上げた移動ユニットの外観を図3.35に、移動機構部と吸着ユニット部の様子を図3.36に示す。

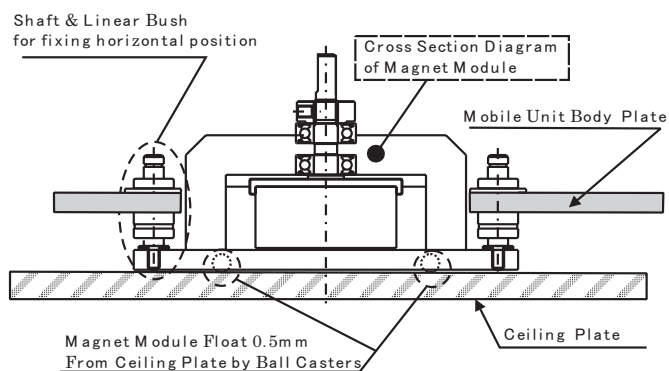


図 3.34: 移動ユニットへの吸着ユニットの取り付け

表 3.7: 移動ユニットの基本仕様

Drive mechanism	Two drive wheels and two ball casters
Body size	340 × 320 × 150 (mm)
Weight	10 (kg)
Minimum rotation radius	0 (mm)
Max drive speed	125(mm/sec)

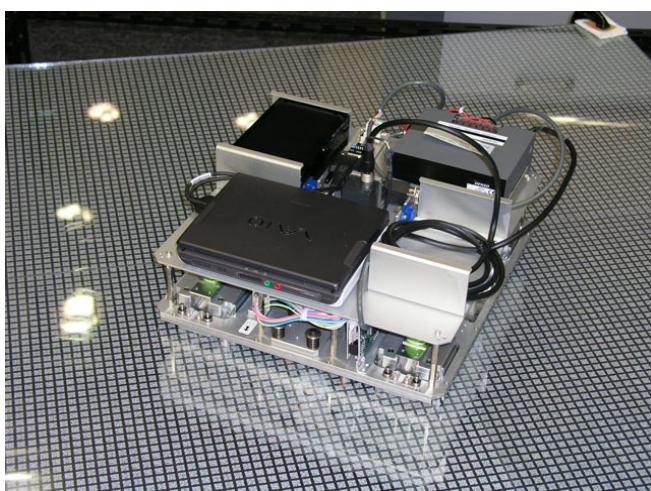


図 3.35: 組み上げた移動ユニット

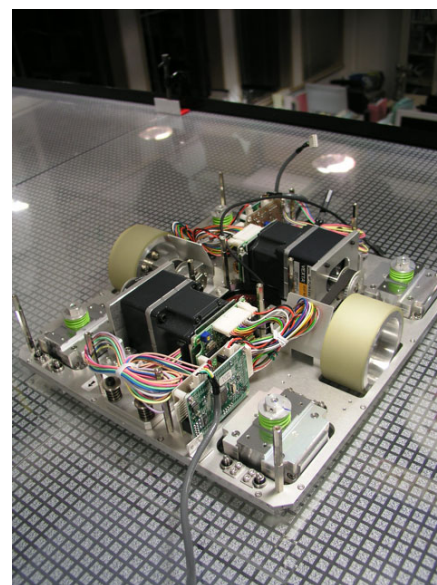


図 3.36: 組み上げた移動の移動機構部と吸着ユニット部

3.3 リンクアップユニットの実装

本章では2.3.4節で述べたリンクアップユニットの連結機能および過負荷保護機能の実装方法およびそれらを統合したリンクアップユニットの全体設計・組み上げについて述べる。

3.3.1 連結機能の実装

本節では2.3.4で述べたようにアクチュエーションユニットとの連結機能の実現方法であるスライド機構の実装について述べる。

アクチュエーションユニットはどれも規定のサイズ $H319(\text{mm}) \times W319(\text{mm}) \times T5(\text{mm})$ の平板を連結部として持つこととし、リンクアップユニットはその平板が横から挿入されるように設計を行った。図3.37に連結機構部を示す。横側よりスライドインサートされた平板は合計8つのモールドベアリングによって横滑りするように連結部に入り込む。

そして平板を規定の位置まで挿入した後、アクチュエーションユニット側に取り付けられたインデックスプランジャによって固定する仕組みとなっている。

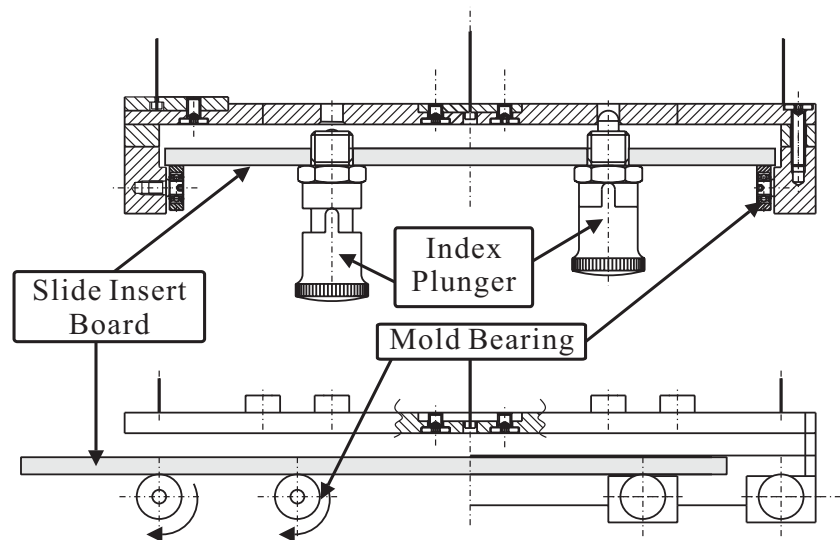


図 3.37: リンクアップユニットの連結機構部

3.3.2 過負荷防止機能の実装

本節では2.3.4で述べた過負荷防止機能を定荷重バネによって実装する手法について述べる。

必要仕様の整理

過負荷防止機能として利用する定荷重バネに吊り下がるのは、本リンクアップユニットの連結機構部とさらにその下の各アクチュエートユニットである。今回はそれらの総重量を 15(kgf) と見積った。リンクアップユニットのベースの形状が四角形なので点対象に 4 つの定荷重バネを設置することとしたのでバネが支える荷重は約 4(kgf) ということになる。ストロークについては天井面から人間の腰の高さ程度まで伸ばすことを考えて 1,500(mm) と設定した。

定荷重バネの選定と実装

引き込み力 4(kgf) というスペックを満たす定荷重バネのサイズではリンクアップユニットに非常に大きなベース板が必要となることが判明したため、1 ランク下の引き込み力 3(kgf) の定荷重バネを用いることとし、残りの荷重は補助マグネットによって支えることとした。今回採用した定荷重バネは図 3.38 に示す(株)サンコースプリング製のコンストン NWT 型と呼ばれるものである。標準仕様の NWT 型ではストロークが十分ではないことに加え先端の金具が必要以上に大きいので、ストロークを長くし、先端金具を独自の金具に取り替えた特注仕様のコンストンを作成していただいた。今回特注したコンストンの仕様を表 3.39 に示す。

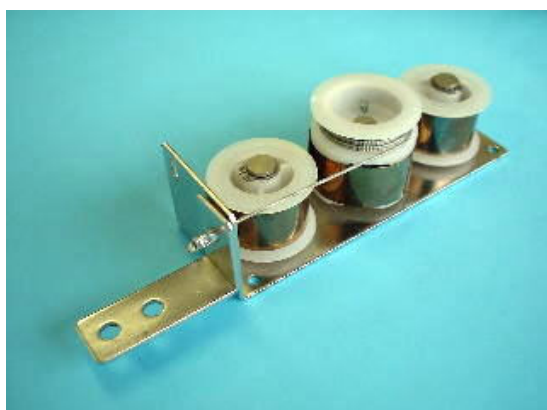


図 3.38: 定荷重バネ「コンストン NWT 型」

図 3.39: コンストン NWT 型 (特注) の仕様

型番	NWT 3.0 -1,500 (特)
ワイヤ引き込み力	3.0 (kgf)
ワイヤストローク	1,500 (mm)
ライフ	6,000 (往復回)
寸法	138 × 46 × 35 (mm)
自重	0.5 (kgf)
先端取付金具	SUS304 製特注部品

補助マグネットとして採用したマグネットは厚さ 6(mm) の鉄板 (表面研磨済) に接触しているときに 1(kgf) の吸着力が出るもの 4 つと、2(kgf) の吸着力が出るもの 4 つである。今回の構造上全ての磁石が金属面に接触できるわけではないので、実際に必要な補助引き込み力よりも想定される吸着力の方が大きくなっている。

3.3.3 リンクアップユニットの全体設計・組み上げについて

リンクアップユニットは図 3.40 に示すように吸着ユニットにぶら下がる構造になっており、下側に実際に動作するさまざまなアクチュエータと連結できるようにスライダ機構を有する。

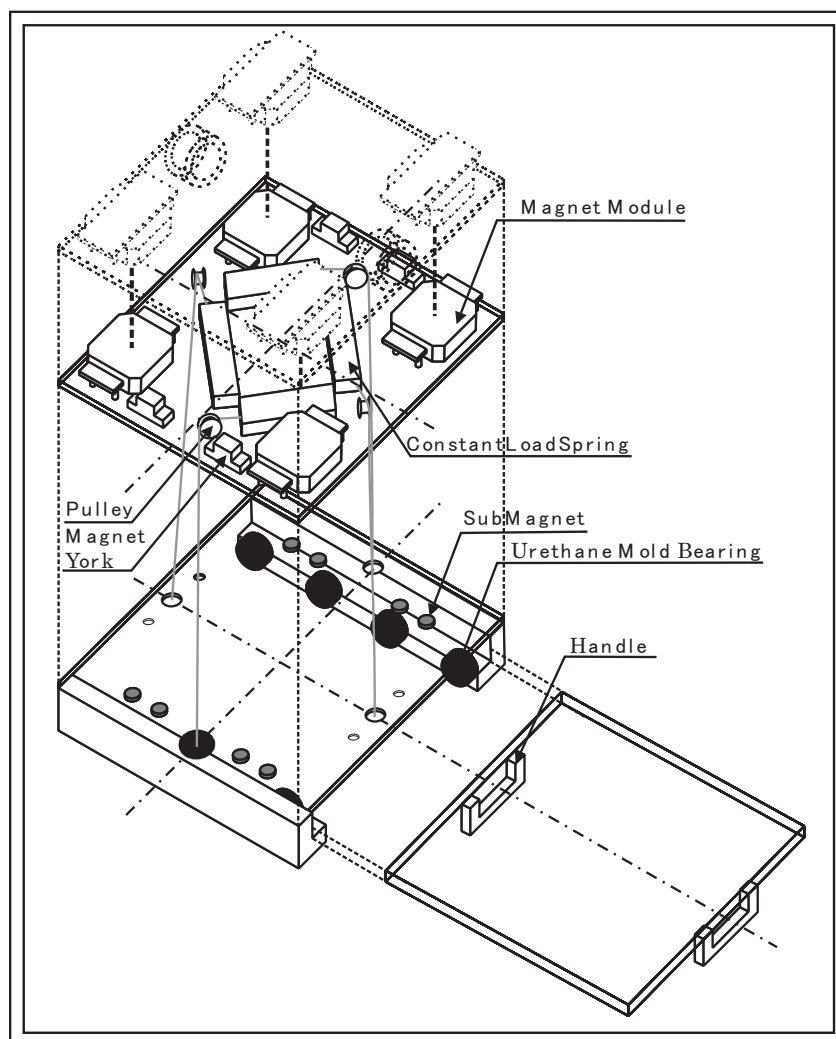


図 3.40: リンクアップユニットのパース図

また磁石モジュールの3つは同一平面上に完全に固定されているが、1つは図 3.41 のようにバネを用いて、上下に動くようになっており、これにより3つの磁石モジュールで決まる平面に残りの1つが位置を合わせる構造になっている。この構造により天井面が撓んだ場合にも安定して4つの磁石で平面を支えることが可能となっている。

また 3.3.2 で述べたように今回使用したコンストンだけでは、下側のアクチュエーションユニットの全荷重を支えることができないので、補助マグネットが4箇所、2個ずつ設置されている。以上のようにして組み上げた組み上げたリンクユニットを図 3.42 に示す。なお組み上げたリンクアップユニットの総重量は 8.2(kgf) であった。この重量は製作前の見積りの範囲内の値である。

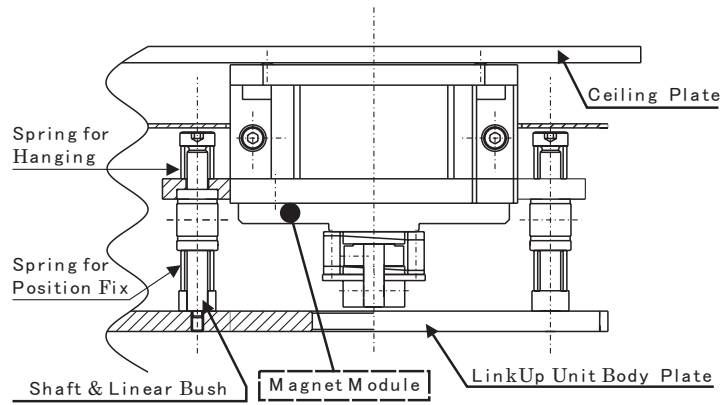


図 3.41: バネを介した磁石モジュールとリンクアップユニットの結合部

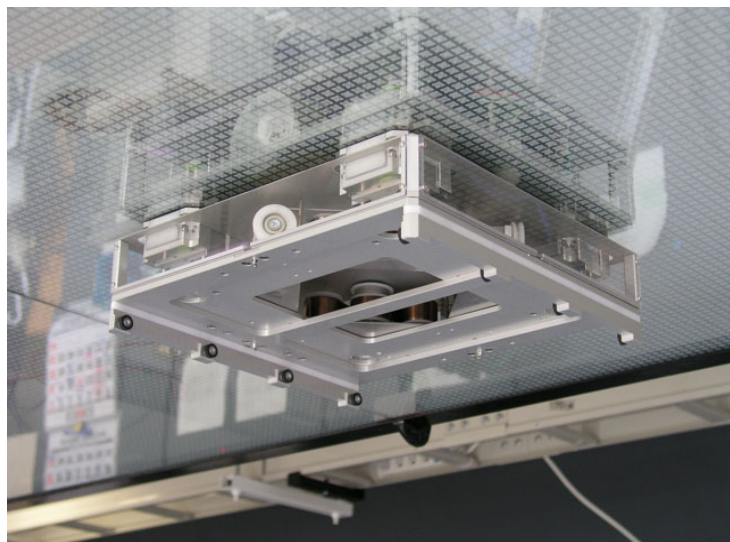


図 3.42: 組み上げたリンクアップユニット

3.4 物理支援型アクチュエーションユニット(クレーンユニット)の実装

本章では2.3.5節で述べた物理支援型アクチュエーションユニット(クレーンユニット)の伸縮機能および環境認識機能の実装およびそれらを組み込んだクレーンユニットの全体設計・組み上げについて述べる。

3.4.1 伸縮機能の実装

伸縮機能は2.3.5節で述べたように動作の安定性からタケノコ型を採用することにした。この節ではそのタケノコ型伸縮機構の要求仕様の整理、機構設計、動力計算およびモータの選定、各機構部の実装について述べる。

伸縮機構の要求仕様の整理

この節では伸縮機構に求められる仕様を整理する。伸縮部の下に取り付ける天板およびそのほかの部品の重さおよび天板に載せる部品の総重量を10(kgf)と見積もった。また伸縮のストロークは天井面を2,750(mm)前後と設定し、その天井面より普通の机上面までアクセスできる長さとして2,000(mm)とした。そして縮小時のクレーンユニット全体の天井面下長さは天井面より人間の頭の高さに達しないようにと750(mm)とした。リンクアップユニットの高さおよびクレーンユニットの天板厚さなどを考えると伸縮部の縮小時に許される長さはおよそ500(mm)である。また伸縮速度は2,000(mm)の長さを20(sec)ほどで伸び縮みすることとして100(mm/sec)とした。

以上の要求仕様をまとめたものを表3.8に示す。

表 3.8: 伸縮機構の要求仕様

総吊り上げ荷重	10 (kgf)
ストローク	2,000 (mm)
縮小時長さ	500 (mm)
伸縮速度	0 ~100 (mm/sec)

機構設計および耐荷重計算

まずパイプ中心を通るワイヤーの選択であるが、今回は巻き取り量と伸縮長さができるだけ比例関係になるようにと、ワイヤではなくスチールベルトを採用することとした。吊り下げ機構にて平面を支えるときには最低で3本のスチールベルトが必要となる。またこれ以上のスチールベルトを平面に結ぶとそのベルトが撓んでしまうということが考えられる。そこで今回はスチールベルトは3本のみ利用することとし、この3本で総吊り下げ荷重10(kgf)を支えられるベルトを探した。ベルトとして採用したのは(株)ディムコの

オープンスチールベルトで、その仕様を表 3.9 に示す。このタイプのスチールベルトは一

表 3.9: スチールベルトの仕様

品名	オープンベルト (DOタイプ)
材質	DO1884
引張強さ	115 (kgf/mm^2)
硬度	370 (Hv)
ヤング率	18500 (kgf/mm^2)
熱膨張係数	$17.3 \times 10^{-6}(C^\circ)$

番薄く幅が狭いタイプで 0.05(mm) 厚、5(mm) 幅となる。このタイプスチールベルト 3 本分の最大引張荷重は式 3.11 のようになり今回の想定荷重 10(kg) の 8 倍程度なのでこのスチールベルトを採用することとした。またスチールベルト端にはネジで固定するための穴を開ける必要がある。この穴を開ける部分は強度が弱くなるためステンレスの薄板を溶接し補強することとした。補強の詳細は Appendix のクレーンユニット計画図 (A.6) に示す。

$$((0.05(mm) \times 5(mm)) \times 115(kgf/mm^2)) \times 3 = 86.25(kgf) \quad (3.11)$$

次にこのスチールベルトを巻きつけるプーリーであるが、幅 6(mm) の平ベルト用プーリーに追加工を施し利用することにした。そしてプーリーの直径は埋め込まれる天板の厚さとの関係から 30(mm) とした。またこのスチールベルトを通す外側のパイプであるが、ステンレス製の薄肉研磨パイプを利用することとし、径の異なるパイプどうしの連結にはリニアブッシュを用いることとした。薄肉ステンレスパイプおよびリニアブッシュの組み合わせで要求仕様のストロークと縮小時長さを満たすために各段のステンレスパイプの長さを求める必要がある、タケノコ型の機構上最上段のパイプの長さが決まると他の段のパイプの長さは自動的に決定されることになる。簡易計算の結果、ストローク及び縮小時長両方の仕様を満たすためには最低でも 5 段階のタケノコ型にする必要があることが判明した、そこで 5 段目のパイプの長さによって伸張時の長さがどのようになるかを計算し図 3.43 のようなグラフを作成した。この結果、要求仕様を満たすために 5 段目のパイプ長さを 300(mm) とすることになった。

この 3 つのプーリーを巻き取る機構であるが、後の全体設計・組み上げの節に示す図 3.53 のように 3 つの軸が連動して動作するように 1 つのモータの出力をアンギュラマイタギアにて 120 度ずつ偏向させて伝達してすることとした。今回仕様したアンギュラマイタギアは小原歯車工業(株)社製のものである。このアンギュラマイタギアの仕様を表 3.10 に示す。

また今回はクレーンを指定の位置で停止させ、その位置を持続させるためにブレーキを実装する必要がある。今回はディスクブレーキなどを実装するのではなく、ブレーキと減速を同時に行えるウォームとウォームウィールを採用することとした。今回ウォームギアとして採用したのはアンギュラマイタギアと同様に小原歯車工業(株)社製のものであ

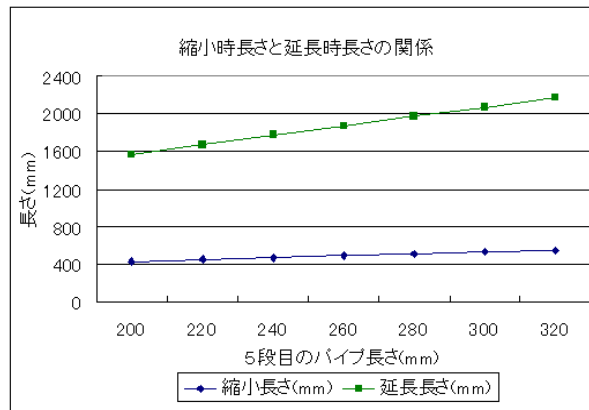


図 3.43: 5 段目のステンレスパイプ長さとストロークおよび縮小時長さの関係

表 3.10: 採用したアンギュラマイタギアの仕様

型番	SAM1.5-20120	精度等級	JIS B 1704 3 級
モジュール	1.5	歯数	20
軸角	120 (度)	圧力角	20 (度)
材料	S45C	歯面仕上げ	切削
質量	0.07 (kg)	表面処理	黒染め

る。本ウォームギアの選択は主に荷台の高さによる規制から定まったのでここではその選択手順の詳細は述べない。表 3.11 に採用したウォームギアの仕様を述べる。

動力計算およびモータの選定

本節では前節に示したような機構にて巻き上げを行う場合に必要な動力計算およびモータの選定について述べる。モータの選定まで以下の手順で行われた。

1. ギアヘッド軸回転数の計算
2. モータ軸の必要トルク計算
3. 必要動力の計算
4. モータの型番選定

以降で各手順について詳しく述べる。

(1) ギアヘッド軸回転数の計算

表 3.11: 採用したウォームギアの仕様

型番	SWG1-R1	精度等級	KHK W 001 2級
条数	1	ねじれ方向	R
進み角	3° 35''	圧力角	20 (度)
材料	S45C	歯面仕上げ	研削
質量	0.05 (kg)	熱処理	高周波焼入れ
表面処理	研削部以外黒染め		

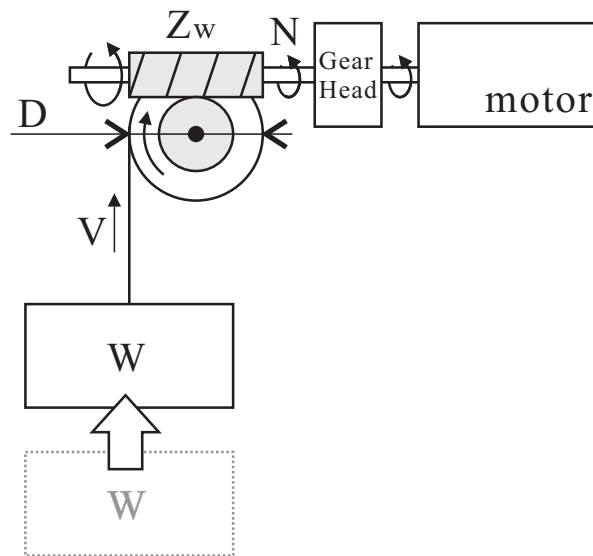


図 3.44: クレーンユニットの力学モデル

まず今回のクレーンユニットの力学モデルを図 3.44 に示す。ギアヘッド軸に求められる回転数は以下の式 3.12 によって求められる

$$N = \frac{V \times 60 \times Z_w}{\pi D \times 10^{-3}} = \frac{0.1 \times 60 \times 20}{3.14 \times 30 \times 10^{-3}} = 1273... \simeq 1300 \quad (3.12)$$

必要仕様 (表 3.8) の最大巻き上げ速度を満たすようにギアヘッド軸の回転数を決定する。式 3.12 中の変数の内容を表 3.12 に示す。計算の結果ギアヘッド軸の必要回転数はおよそ 1300(rpm) となる。

(2) ギアヘッド軸の必要トルク計算

次に図 3.44 に示す力学モデルにおけるギアヘッド軸の必要トルクを計算する。ギアヘッド軸の必要トルクは式 3.13 によって計算される。ここでの各変数は式 3.12 と同様のもの

表 3.12: 式 3.12 中の変数の説明

文字	内容	単位	実際の値
N:	ギア軸必要回転数	rpm	—
V:	巻き上げ速度	m/s	0.1(m/s)
D:	プーリ直径	mm	30(mm)
Z_w :	ウォーム減速比		20

と表 3.13 に示されたものである。この式に値を代入すると、式 3.14 のように計算され、ギアヘッド軸の必要トルクはおよそ 0.25(Nm) となる。

$$T_L = \frac{9.8 \times W}{Z_w \times \mu_w \times \mu_m} \times \frac{D \times 10^{-3}}{2} \quad (3.13)$$

$$T_L = \frac{9.8 \times 10}{20 \times 0.5 \times 0.6} \times \frac{30 \times 10^{-3}}{2} = 0.245... \simeq 0.25 \quad (3.14)$$

表 3.13: 式 3.14 中の変数の説明

文字	内容	単位	実際の値
T_L :	ギアヘッド軸必要トルク	Nm	—
W	総荷重質量	kg	10 (kg)
μ_w	ウォームギア機械損失	—	0.5
μ_m	マイタギア機械損失	—	0.6

(3) 必要動力計算

$$P = \frac{N \times T_L}{60 \times \mu_{gh}} = \frac{1273 \times 0.245}{60 \times 0.88} = 5.906... \simeq 5.9 \quad (3.15)$$

必要動力は式 3.15 のように計算される。表 3.14 に式 3.15 中の変数についての説明を記す。ギアヘッド機械損失 μ_{gh} は DC モータカタログの遊星ギアの欄に記されている値である。計算の結果、必要動力は 5.9(Watt) と計算された。

(4) モータ選定

この章で計算してきたモータの条件をアプリケーションデータとして表 3.19 にまとめる。

表 3.14: 式 3.15 中の変数の説明

文字	内容	単位	実際の値
P:	必要モータ出力	Watt	—
μ_{gh} :	ギアヘッド機械損失	—	0.88

表 3.15: クレーンユニット用 DC モータアプリケーションデータ

出力動力	5.9 (W)
出力トルク	0.25 (Nm)
ギア軸回転数	1,300 (rpm)
供給電圧	24 (V)

電源の 24V は移動ユニットと同じ仕様の電源で動作させることを考えて設定した値である。モータの選定においては、各アプリケーションデータに対して、移動ユニットと同様に次のような条件を満たしている必要がある。

1. 出力動力は必要動力の 2 ~ 3 倍以上
2. 必要回転数は無負荷回転数の 1/2 以上
3. 必要トルクはギアヘッドの許容軸トルクを越えない

以上の条件を満たすモータおよびギアヘッドのペアを選んだところミニモータ社製 DC モータが採用された。その写真を図 3.45 に示し、そのカタログデータを表 3.46 に示す。

各機構部の実装

以上の設計後それぞれの機構部を実装した。図 3.47,3.48,3.49,3.50 に実装した様子を示す。

図 3.47 はオープンスチールベルトとそのベルトを巻き取るためのベルトプーリの実装の様子である。図 3.48 はアンギュラマイタによって軸が 120 度偏向されている様子を示している。図 3.49 は作成したオリジナルのウォームギアホルダである。図 3.50 はテンスパイプの伸縮スライドをスムーズに行うためのリニアブッシュの実装の様子である。

3.4.2 環境認識機能の実装

2.3.5 節で述べたようにクレーンユニットの環境認識機能として超音波センサを用いることとした。今回の超音波センサに求められるスペックは測定距離が 2(m) ほどで、サンプリングレートが 10(Hz) 以上のものである。これは移動している人間の歩行スピードが



図 3.45: 採用したクレーンユニット用DCモータ

図 3.46: DC モータ及びギアヘッドのカタログデータ

製品名	DC マイクロモータ
型番	3557-024CR
定格電圧	24(V)
端子間抵抗	2 (Ω)
最大出力	70.8(Watt)
無負荷回転数	5,300(rpm)
製品名	遊星ギア
型番	30/1
減速比	3.71:1
最大入力回転数	3,000(rpm)
許容軸トルク (連続)	1.5(Nm)
許容軸トルク (断続)	3.0(Nm)
効率	88(%)

秒速 2(m/sec) ほどであることを考え、その人間の動きをモニタリングして対処するためには一桁上の測定を行うことが必要であると考えたからである。また今回はアンプ回路を内蔵した超音波センサで比較的安価で販売されているものという条件も加わったため、パナ・エンジニアリング製の超音波センサを採用することとした。採用した超音波センサの仕様を表 3.16 に示す。この超音波センサを斜め下周方向に向けて3つ、また下方に向けて1つ取り付けることとした。このセンサによって荷台下降時の障害物の検出や下降停止状態での周囲の障害物のモニタリングなどを行う。このセンサの取り付けの様子を図 3.51,3.52 に示す。

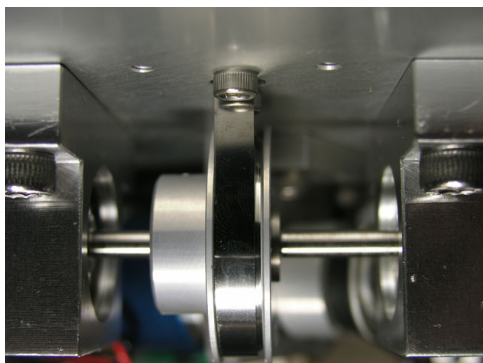


図 3.47: スチールベルトとベルトプーリ

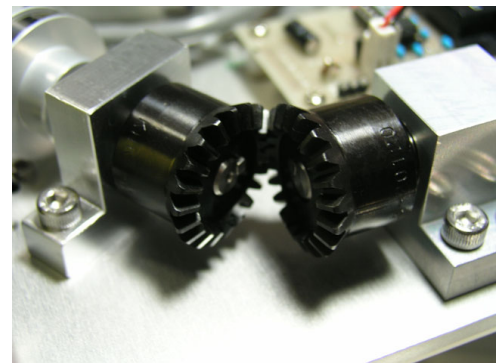


図 3.48: アンギュラマイタによる軸偏向の実装

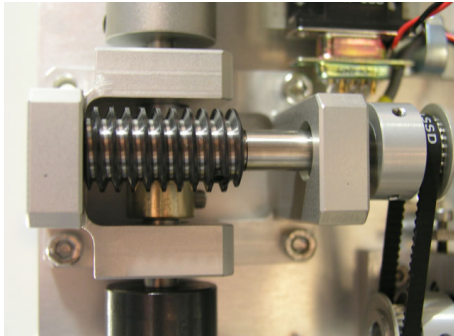


図 3.49: 実装したウォームホルダ

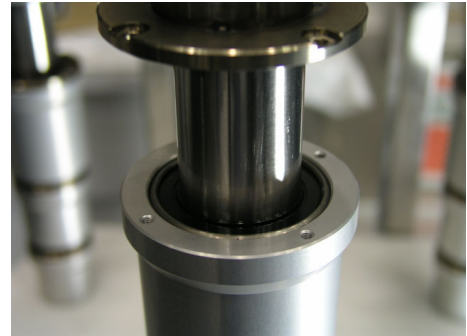


図 3.50: ステンレスパイプとリニアブッシュ

表 3.16: 採用した超音波センサの仕様

型番	T30UUNA	測定距離	150 ~ 1,000 (mm)
周波数	228 (kHz)	応答時間	48(msec)
電源	DC 15 ~ 24 (V)	出力	0 ~ 10 (V)

3.4.3 クレーンユニットの全体設計・組み上げ

本章では以上の各機能、機構を組み込んだクレーンユニットの全体設計および組み上げについて述べる。クレーンユニットの荷台の部品配置のスケッチを図3.53に示す。このスケッチに示すように荷台の重心位置を考慮し3本の伸縮機構部を正三角形の頂点に配置し、その下におむすび型のような六角形の荷台を取り付けることとした。今回、バッテリーはこの荷台側に埋め込むこととするため、ほとんど全ての機構・部品をすべてこの荷台に埋め込むこととなった。次章で述べるコントロール回路や無線機を実装するスペースを確保するために小型のハイトルクタイミングベルトを用いモータの位置を中心部よりずらすなどの細かい工夫が行われている。またリンクアップユニットの節で述べたようにアクチュエーションユニットはインデックスプランジャ付の規定サイズ(H319(mm)×W319(mm)×T5(mm))の板をリンクアップユニットの連結のために装備している必要がある。本クレーンユニッ

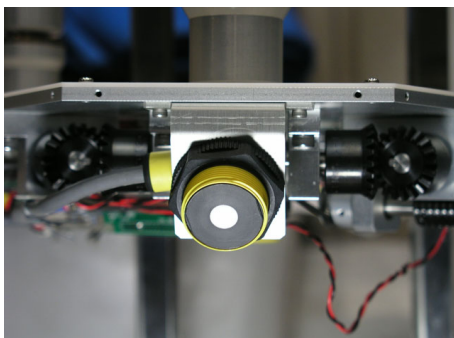


図 3.51: 超音波センサ（周方向取り付け）

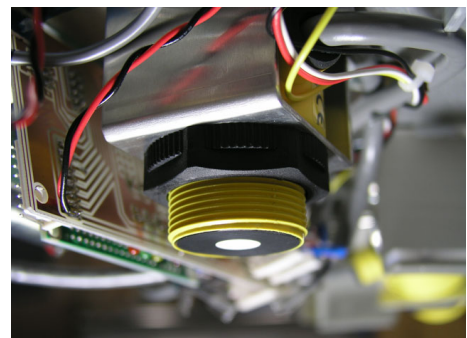


図 3.52: 超音波センサ（下方向取り付け）

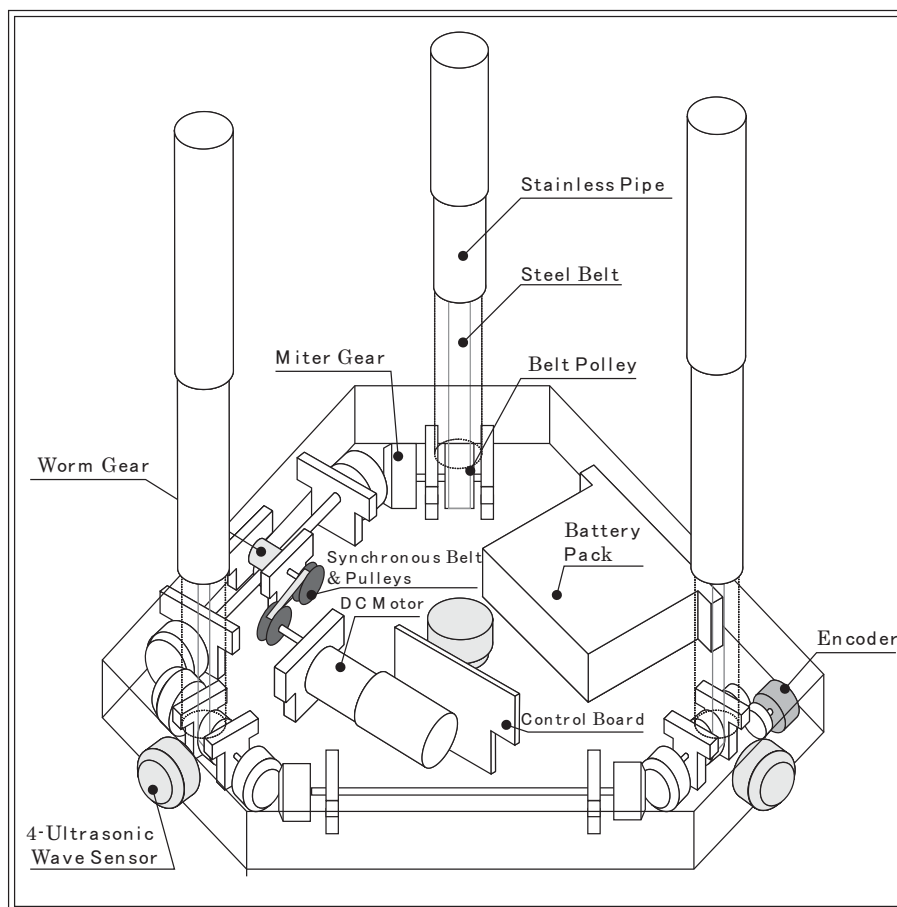


図 3.53: クレーンユニットのパーススケッチ

とも3本のタケノコ型伸縮機構がこの大きさの連結板に接続される構造とする。以上のような設計を行ったクレーンユニットの組み上げを行った。図 3.54, 3.55, 3.56, 3.57 に組み上げたクレーンユニットを示す。図 3.54 はコントロール回路なども実装された荷台の様子で、図 3.55 はリンクアップユニットとの連結部の様子である。図 3.56 はクレーンユニットが伸張した時の、図 3.57 クレーンユニットが一番縮小した時の様子である。

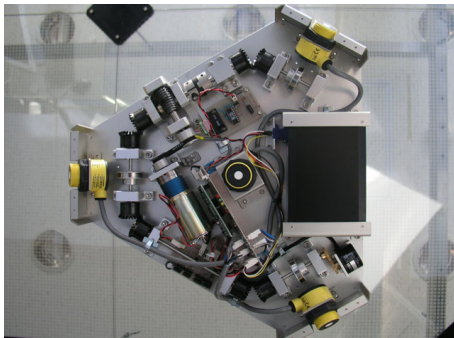


図 3.54: 組み上げたクレーンユニットの荷台

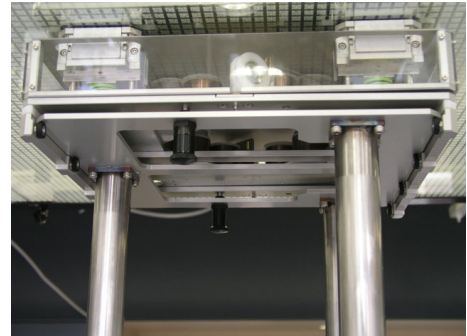


図 3.55: クレーンユニットとリンクアップユニットの連結部



図 3.56: 伸張時のクレーンユニット

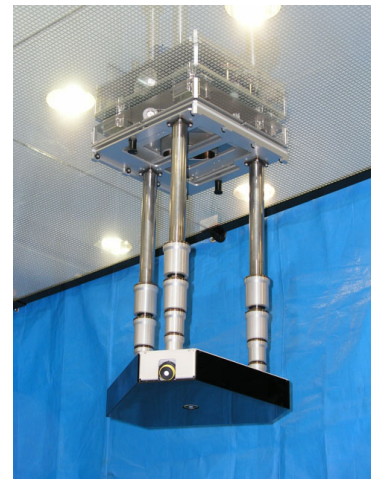


図 3.57: 縮小時のクレーンユニット

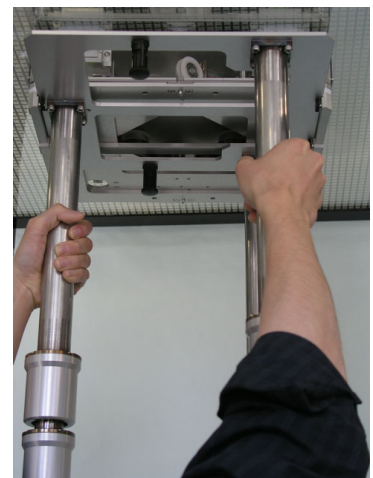


図 3.58: クレーンユニットとリンクアップユニットの連結作業

3.5 コントロールネットワークの実装

本章ではここまでで作成してきた各ユニット制御するためのコントロールネットワークについて述べる。まずはコントロールネットワークの概要としてネットワークの構造および伝送されるデータについて述べる。次に移動ユニットに搭載される電源・信号分配回路の実装およびブラシレスDCモータを制御するためのモータコントローラ回路のハード・ソフトウェアの実装とコマンドフォーマットについて述べる。さらに次にクレーンユニットに搭載される回路群について同様にハード・ソフトウェアについて述べる。最後に移動ユニット上に搭載されるユニット統合PC上で動作するソフトウェアについてその実装を述べる。

3.5.1 コントロールネットワークの概要

ネットワークの構造

本節ではコントロールネットワークの構造について、各コンポーネントで使用される具体的な機器を取り上げながら述べる。まず最初に図3.59にネットワークの全体構成を示す。2.3.6節にてコマンドの伝達層が3層に分別されることを述べ、そのうち下位2層のコントロールコマンド層とインターナルコマンド層のみを実装することを述べた。

本コントロールネットワークでコントロールコマンド層に属するのが移動ユニット上に搭載される統合PC (Integration PC) である。このPCに必要とされる仕様を次にまとめる。

- 移動ユニットに搭載されるので、可能な限り小型で軽量であること。ハードウェアの制限上サイズとしてはB5サイズ以下のものが妥当である。
- IEEE802.11(a,b,g) 無線LANの機能を搭載してTCP/IPによるSocket通信を無線にて行えること(拡張オプションによる対応も可)
- モータコントローラバスと2次元コードリーダ接続用としてRS232Cシリアルポートを2ポート以上持つこと(拡張オプションによる対応も可)
- クレーンコントローラとの通信用にBluetoothによる無線通信を行えること(拡張オプションによる対応も可)

以上の条件を満たすPCとしてはサイズの関係上Sony製”Vaio U-505”(図3.60)のみが当てはまったのでこれを採用することとした。このHandheld PCは標準でIEEE802.11bの無線を内蔵しているものの、RS232CのシリアルポートおよびBluetooth無線を内蔵していないので、RS232CはQuatech社のPCカードタイプの2ポートシリアル拡張カード(図3.61)を利用し、Bluetoothはハギワラシスコム社のUSB Stick(図3.62)を利用することとした。

次にインターナルコマンド層の構成であるが、インターナルコマンド層では移動ユニット上の統合PCとのデータのやり取りを行い各部を制御することが求められる。このインターナルデータ層に属するのが、以下の3つである。

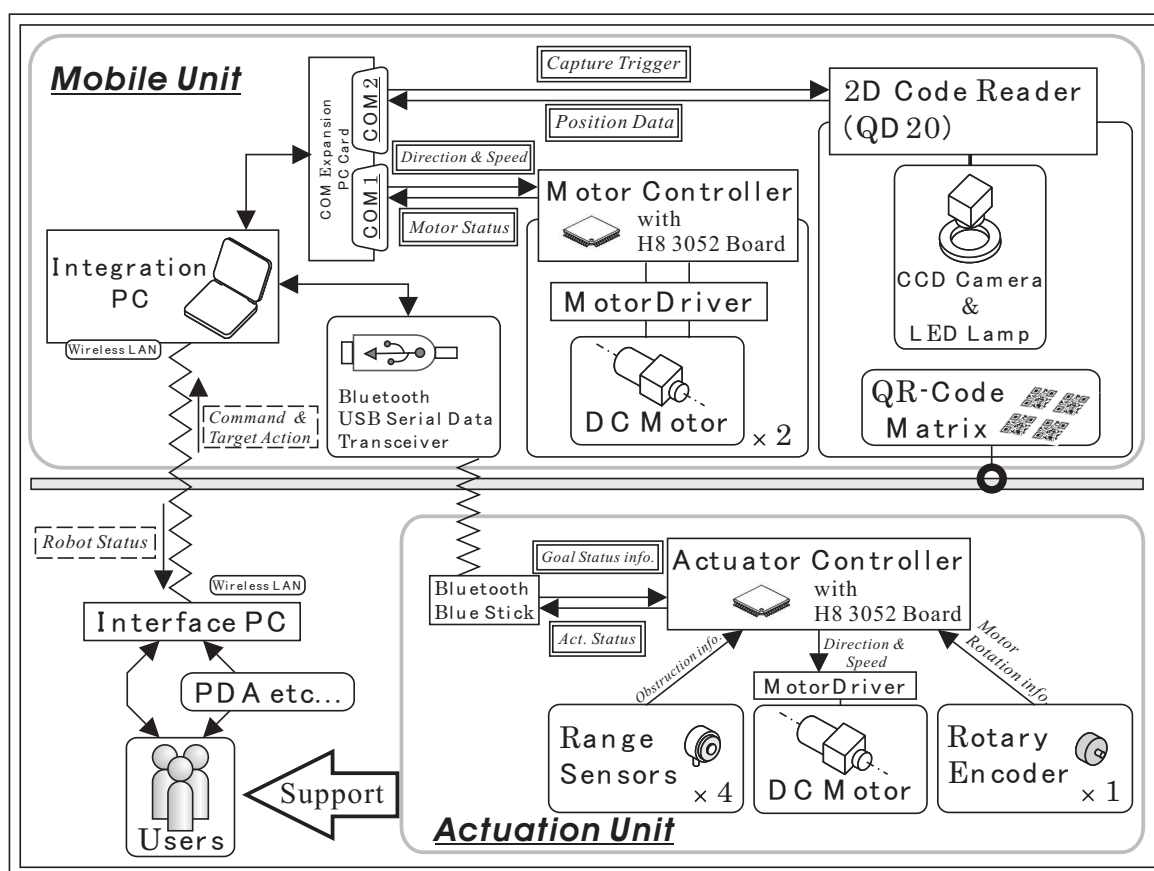


図 3.59: コントロールネットワークの全体構成

- 移動ユニット用モータコントローラ
移動ユニットに搭載した2つのブラシレスモータの回転指令の伝達や回転数の読み込みなどを行う
- 2次元コードリーダーコントロールボックス
これはデンソーウェーブに改造を依頼し購入したもので、2次元コードのデータにCCDカメラ座標における読み取りコードの位置を付加してデータ送信を行ってくる
- アクチュエーション(クレーン)ユニットコントローラ
クレーンユニットのモータの制御、高さの読み込み、超音波センサの読み込みなどを行う。

これらのうち、移動ユニット用モータコントローラとアクチュエータ(クレーン)ユニットコントローラに関しては自作をする必要がある、これらについては後ほど詳細を述べる。

コマンド層間のデータ通信

コントロールコマンド (ユーザコマンド層 \longleftrightarrow コントロールコマンド層のデータ通信)

図 3.59 において、矢印に付属する点線に囲まれたものがコントロールコマンドである。コントロールコマンドのデータのやりとりは TCP/IP の Socket 通信経由で行われる。ユーザコマンド層からのデータ (すなわちコントロールコマンド) は一度移動ユニット上の統合 PC に無線 LAN 経由で伝達され、その中で解釈・処理をされて各コンポーネントへと伝達されるインターナルコマンドへと変換される。

インターナルコマンド (コントロールコマンド層 \longleftrightarrow インターナルコマンド層のデータ通信)

図 3.59 において、矢印に付属する 2 重線に囲まれたものがインターナルコマンドである。コントロールコマンド層とインターナルコマンド層のデータ通信はすべてシリアル通信で行われる。そのため移動ユニット上の統合 PC は 3 系統の COM ポートを管理することになる。シリアル通信のプロパティを表 3.17 にまとめる。なお 3 つとも共通して、データ長 8(bit)、パリティなし、Stop ビット 1(bit)、フロー制御なしに設定されている。

表 3.17: 移動ユニット上統合 PC とインターナルコマンド層のシリアル通信の設定

通信経路	通信形式	ポート	伝送速度
⇒ 移動ユニット用モータコントローラ	RS232C 有線	COM1	57,600(bps)
⇒ 2次元コードリーダ	RS232C 有線	COM2	38,400(bps)
⇒ クレーンユニットコントローラ	Bluetooth 無線	COM4	9,600 (bps)

コントロールコマンドの実装

次にコントロールコマンドの種類とそのフォーマットについてまとめる。なおインターナルコマンドの詳細については後ほど回路の実装と合わせて述べる。

まずコントロールコマンドの基本構造について図 3.64 に示す。コントロールコマンド



図 3.60: Vaio U-505 (統合 PC)



図 3.61: 2ポートシリアル拡張カード

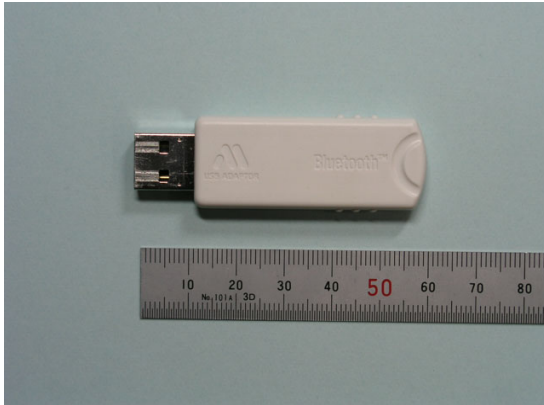


図 3.62: Bluetooth USB Stick

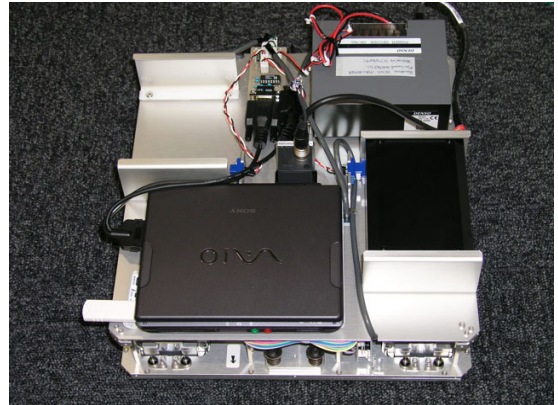


図 3.63: 移動ユニットに搭載した統合 P C

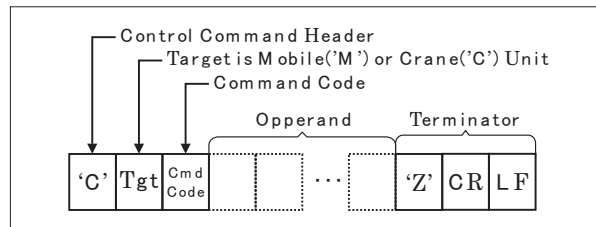


図 3.64: コントロールコマンドのフォーマット

はキャラクタベースの体系となっており、文字は基本的にすべて大文字を用いることとなっている。また各コマンドには人間が目視できるためのターミネータ'Z'とプログラム上で文字列読み込みを実現するためのターミネータ"CR,LF" 両方を末尾に付加する形をとっている。

次に各コントロールコマンドの種類とオペコード、オペラントを整理する。コントロールコマンドは属性および情報の転送先によって整理することができる。表 3.18 にコントロールコマンドの一覧を示す。

3.5.2 移動ユニット用回路の実装

本節では電源・信号分配回路および移動ユニット用モータコントロール回路の実装について述べる。

電源・信号分配回路の実装

移動ユニットでは2系統のバッテリーパックからの電源を入力とし、モータコントローラ × 2 個および2次元コードリーダコントロールボックスへの電源分配供給が必要となる。また統合 P C より2つのモータコントローラへの信号伝達はシリアル通信のバス結線にて行われるため、統合 P C の信号線を分配することも必要である。この電源とシリアル

表 3.18: コントロールコマンド一覧

属性	転送先	内容	OpCode	Opoperand
Unlock	移動ユニット ('M')	前進	F	なし, Vhh, Phhhh, VhhPhhhh
		後退	B	なし, Vhh, Phhhh, VhhPhhhh
		右旋回	R	なし, Vhh, Phhhh, VhhPhhhh
		左旋回	L	なし, Vhh, Phhhh, VhhPhhhh
	クレーン ('C')	上昇	U	なし
		下降	F	なし
Lock	移動ユニット ('M')	移動	D	XhhhhYhhhhR±ddd
		旋回	T	R±ddd
	クレーン ('C')	自動昇降	M	Hhhhh
		高さ初期化	C	なし
Interrupt	移動ユニット ('M')	停止	S	なし
	クレーン ('C')	停止	S	なし

h = Hex number (0 ~ F), d = Decimal number (0 ~ 9).

信号の分配のために配線回路を作成した。作成した回路を図 3.65 に示す。コネクタピンアサインについては AppendixB に示す。

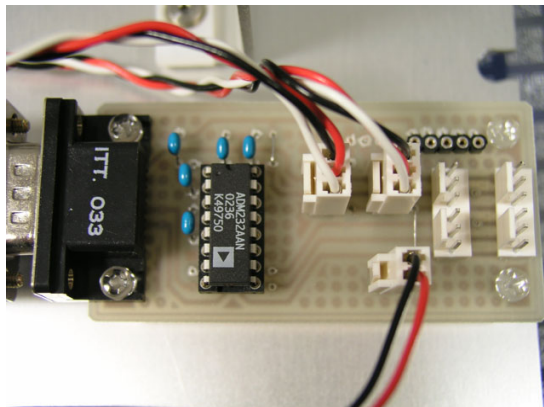


図 3.65: 電源・信号分配回路

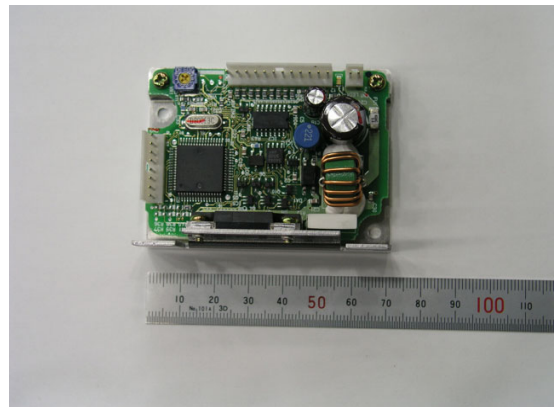


図 3.66: ブラシレスモータに付属の回路

移動ユニット用モータコントロール回路の実装

今回移動ユニットに使用したオリエンタルモータ製のブラシレスモータ”AXH”シリーズにはマイコンを搭載した速度制御用の回路（図 3.66）が用意されている。

ユーザはこの回路に対して、START/STOP, RUN/BRAKE, CW/CCW, INT.VR/EXT, ALARM-RESET の 5 つの信号と SPEED 設定電圧および駆動電力を送り、SPEED 出力

パルス,ALARM 信号を読み込むことでモータを制御させる。以上のことを踏まえて、この基板に搭載するマイコンに必要な仕様を表 3.19 に列挙する。この機能を

表 3.19: モータコントロール基板に搭載するマイコンの必要仕様

機能	Port 数	備考
(6 ~ 8bit) D/A Output	1	速度設定用
Counter	1	速度・回転数読み込み用
RS232C Serial Port	1	コントロールPC通信用
I/O Output	5	回転方向・ブレーキ等設定用
I/O Input	1	アラーム読み込み用
A/D Input	1	バッテリーモニタ用

満たすマイクロプロセッサとして、オーバースペックではあるがルネサス・テクノロジー製 16bit マイコン”H8-3052F” が搭載されたボード(秋月製)を利用し作成した。”H8-3052F”の仕様を表 3.20 に示す。作成したモータコントロール基板を図 3.67 に示す。この基板は

表 3.20: H8-3052F の仕様

CPU	16bit 演算, 最大 25M Hz
内蔵 ROM	Flash 512k Byte
内蔵 RAM	8k Byte
割り込み	外部 7 系統、内部 30 系統
バスコントローラ	8bit/16bit アクセス 2/3 ステート
タイマ	16 bit, 5ch
SCI	独立 2 系統
A/D	10 bit, 8ch
D/A	8 bit, 2ch
I/O	入出力 70 本, 入力 9 本

ボード周囲のピンに引き出されたマイコンの各ポートをそれぞれのコネクタに割り振っているのみで、特別な機能を持っているわけではない。コネクタの端子説明および配線図を Appendix.B に載せる。

コントロールプログラム

モータコントロール基板は移動ユニット統合PCよりコマンドを受け取り動作を行う。今回実装した動作コマンドはキャラクタベースで3種類ある、それぞれのフォーマット及び対応するモータの動作を説明する。まずモータコントロール指令用内部コマンドの

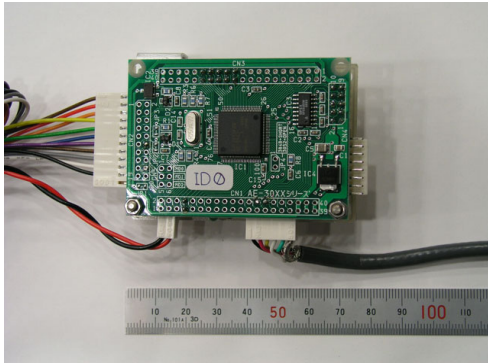


図 3.67: 作成したモータコントロール回路

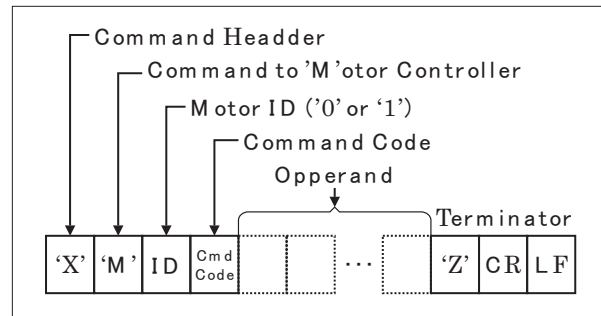


図 3.68: モータコントロール指令用内部コマンドのフォーマット

フォーマットは図 3.68 のようになっている。また図 3.68 における”Command Code” および”Command Operand” について表 3.21 で説明をする。モータコントローラの動作は 1 .

表 3.21: モータコントロールコマンドおよびオペラント

属性	コード	オペラント	設定項目	フォーマット
Unlock	'S' (速度指定)	'C'	回転方向	'F' or 'B'
		"XX"	回転速度	"00" ~ "FF"
Lock	'R' (速度, 回転数指定)	'C'	回転方向	'F' or 'B'
		"XX"	回転速度	"00" ~ "FF"
		"XXXX"	回転数	"0000" ~ "FFFF"
Interrupt	E (停止)	None		

速度設定のみの回転、2 . 速度 & 回転数指定の回転、3 停止命令の 3 種類ある。 回転方向は'F'を設定した場合に移動ユニットが前進をする方向に回転をするようになっている。回転速度は 16 進数で”0x00” ~ ”0xFF” の指定となっておりこれは D/A コンバータの出力値と対応している。回転数は 16 進数で”0x0000” ~ ”0xFFFF” までの値を設定でき、これは搭載されているマイコンの 16 ビットカウンタの値となっている。またモータはギア軸 1 回転で 3000 パルスが出力される仕様になっているので、最大で約 2.2 回転ほどの連続回転指令を与えることができる。

本節の最後としてモータコントローラ回路上の H8-3052F のプログラムの処理の流れを図 3.69 に示す。このプログラムはコマンドの入力の有無を調べ、もし新しい入力がある場合にはそのフォーマットおよび対象モータ ID をチェックする。そしてそれらが適合している場合入力コマンドのパーズを行い、内部状態を変化させるのである。Lock コマンドが入力された後はコマンドの入力の有無のチェックと共に目的の状態に自分が達しているかどうかをチェックし、目的状態になっている場合停止し、タスクが完了したことを統合 PC に報告するようになっている。

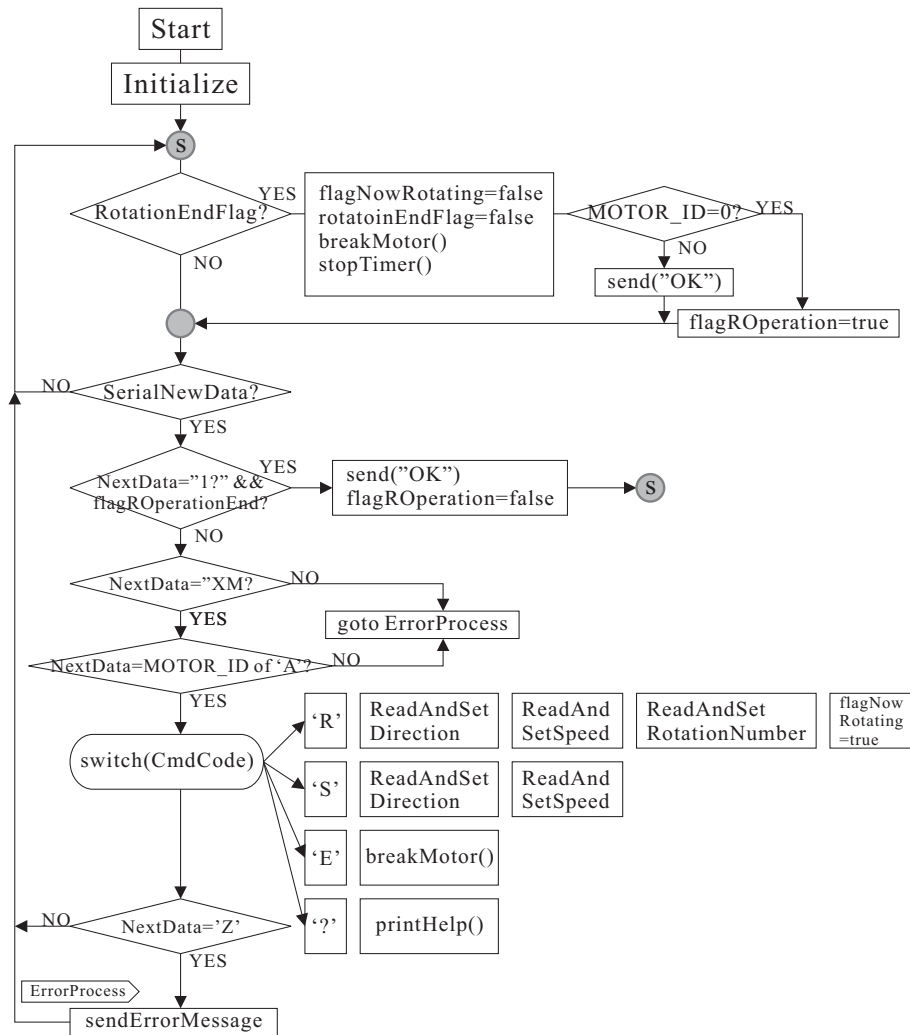


図 3.69: 移動ユニット用モータコントローラ回路のH8プログラムのフローチャート

3.5.3 クレーンユニット用コントローラの実装

クレーンユニット用の回路は3つの回路部から構成される。モータを制御するHブリッジ回路基板、Bluetooth無線機を接続するシリアル無線回路基板、そして統合PCより送られるコマンドにしたがってモータの制御やセンサの読み込みを行うクレーンマザー基板である。以降では各回路について説明をする。

クレーンマザー回路基板

クレーンマザー回路基板に必要な機能は、

- 巻き上げ用モータの（速度、方向、ブレーキ）を制御する
- エンコーダのパルスを読み込んで高さを計算する

- 移動ユニット上の統合PCと通信を行う
- 超音波センサ × 4つのアナログ出力を読み込む
- 搭載バッテリーの電圧をモニタリングする

である。

以上の機能を満たすために、搭載するマイコンに必要とされる仕様を表3.22に示す。今

表 3.22: クレーンマザー回路基板に搭載するマイコンの必要仕様

機能	Port 数	備考
PWM 出力	1	モータ速度設定用
Counter	1	エンコーダ読み込み用
RS232C Serial Port	1	コントロールPC通信用
I/O Output	2	回転方向設定用
A/D Input	5	超音波センサ・バッテリーモニタ用

回、開発の都合上移動ユニットモータコントローラ回路で使用したマイコンと同じマイコン”H8-3052F”を利用することとした、このマイコンは本回路の必要仕様を満たしている。以上の検討の結果、作成した回路ブロック図を図3.70に、実装した回路を図3.71に示す。また回路図およびピンアサイン図をAppendix.Bに掲載する。

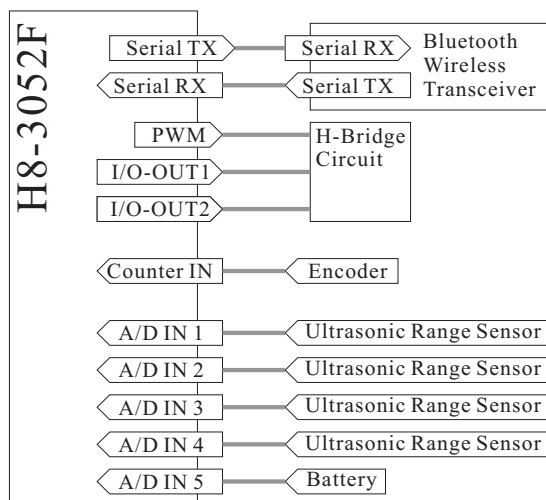


図 3.70: クレーンマザー回路のブロック図

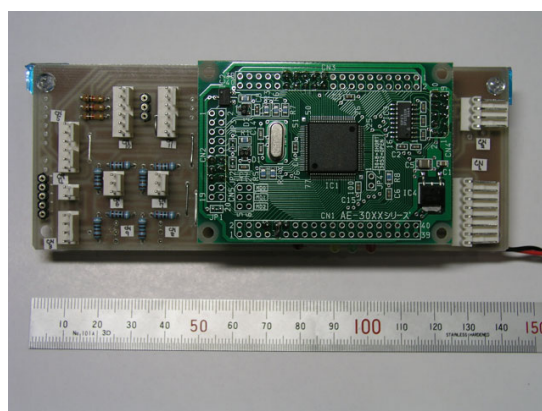


図 3.71: クレーンマザー回路基板

Hブリッジ回路基板

今回のモータでは24Vで数アンペアと大出力が必要となる可能性から市販のモータドライバICは使用せず、MOS-FETによるHブリッジ回路を作成した。図3.72に作成した

回路の写真を掲載する。この回路は回転制御用の2入力端子および速度設定用のPWM入力端子を持つ。各端子とモータの動作の関係を表3.75に示す。

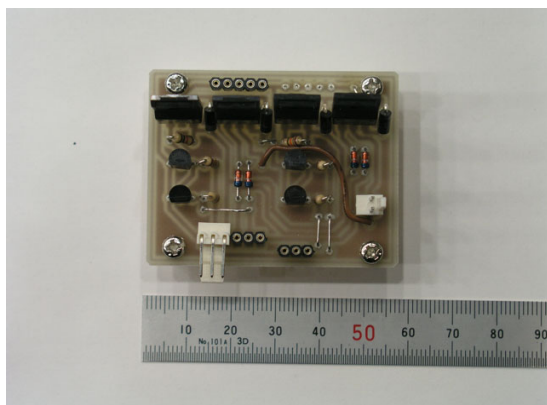


図 3.72: Hブリッジ回路基板

図 3.73: Hブリッジ回路の端子入力とモータ動作の関係

IN1	IN2	PWM	モータ動作
*	*	0	停止
0	0	1	ブレーキ
0	1	1	正転
1	0	1	逆転
1	1	*	ブレーキ

この回路のコネクタ端子の説明および回路図を Appendix.B に掲載する。

Bluetooth シリアル無線回路基板

本回路は移動ユニットに搭載されているホストPCと通信を行うためのシリアル無線機を接続するための回路である。今回利用したシリアル無線機はBluetooth無線技術を利用しているエイディーシーテクノロジー(株)製のBlueStick"AFD0001"である。本回路と無線機の写真を図3.74に示す。また本回路の回路図を Appendix.B に掲載する。

コントロールプログラム

クレーンコントロール基板も移動ユニット用モータコントロール基板と同様に移動ユニットホストPCより動作コマンドを受け取り動作を行う。今回実装した動作コマンドはキャラクタベースで8種類ある、それぞれのフォーマット及び対応するモータの動作を説明する。まずモータコントロール指令用内部コマンドのフォーマットは図3.68のようになっている。また図3.68における"Command Code"および"Command Opperand"について表3.21で説明をする。クレーンコントローラには'U','D','A','E','C'コマンドのようなクレーンの動作を指令するものの他に現在の位置を伸縮長さ0に初期化する'T'コマンド、クレーンユニットでサンプリングした超音波センサなどの値をカンマ区切り文字列のフォーマットでシリアル通信で送りつける'G'コマンドなどが用意されている。最後にクレーンコントローラマザー基板上のH8-3052Fのプログラムの処理の流れを図3.77に示す。このプログラムは移動ユニットモータコントローラのプログラムとほとんど同じ手順で処理を行う。繰り返すと、まずコマンドの入力の有無を調べ、もし新しい入力がある場合にはそのフォーマットチェックする。そしてそれらが適合している場合入力コマンドのパーズを行い、内部状態を変化させる。Lockコマンドが入力された後はコマンドの入力の有無のチェックと共に目的の状態に自分が達しているかどうかをチェックし、目的状態になっている場合停止し、タスクが完了したことを統合PCに報告する。

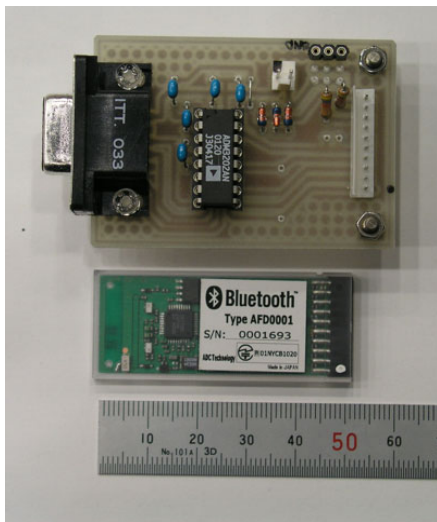


図 3.74: シリアル無線回路基板

図 3.75: BluetoothStick の仕様

項目	内容
型番	AFD000
Interface	調歩同期式シリアル通信
Bluetooth	Ver1.1
周波数	2400 ~ 2483 MHz
Profile	GAP,SPP
通信速度	723.2/57.6 kbps (asymmetrical.max)
受信感度	-80 dbm ~ -20 dbm
通信距離	約 10 m (使用条件による)
変調方式	EHSS/GESK 1 Mbps,1600 hop/sec.
送信電力	4 dbm (TYP) Bluetooth TX power class2
電源	3.0 V DC
消費電流	MAX 83 mA
外形寸法	52.4(L) × 22.2(W) × 4.1(H) mm

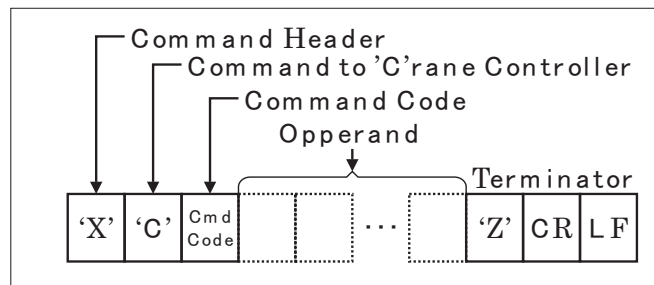


図 3.76: クレーンコントロール指令用内部コマンドのフォーマット

表 3.23: クレーンコントロールコマンドおよびオペランド

属性	コード	内容	オペランド
Unlock	'U'	上昇	なし
	'D'	下降	なし
	'I'	伸縮長さ初期化	なし
	'S'	速度設定	hh (高さ指定)
	'G'	内部パラメータ転送要求	なし
Lock	'A'	自動昇降	hhhh (高さ指定)
	'C'	キャリブレーション	なし
Interrupt	'E'	停止	なし

h = Hex number (1 ~ F)

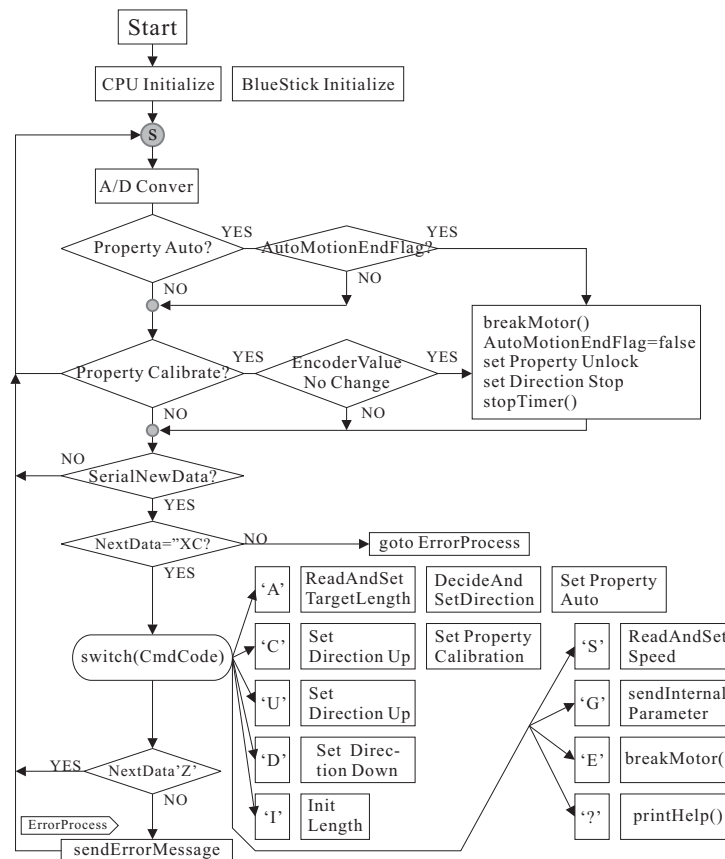


図 3.77: クレーンユニットコントローラ回路のH8プログラムのフローチャート

3.5.4 移動ユニット搭載統合PC用ソフトウェアの設計・実装

本節では移動ユニット上に搭載される統合PC用のプログラムの設計・実装について述べる。またオプションなプログラムとして統合PCにコントロールプログラムを送りつけるシンプルなりモートコントロールプログラムも作成したのでそのプログラムについても簡単に述べる。

統合PC用プログラムの設計

移動ユニットに搭載される統合PC用のプログラムの設計およびコーディングを行った。このプログラムに必要とされる機能を以下にまとめる。

- TCP/IP ソケット通信経由でコントロールコマンドを受け取り解釈する。
- 動作指令および現在の状況を判断して、各ユニットの動作計画を行う。
- 移動ユニットの移動経路生成を行い、経路に沿った移動を実現するためにモータ動作を決定する。
- 移動ユニット上のモータコントローラに対して内部コマンドを送る。
- 移動ユニットに搭載されている、2次元コードリーダーと通信をし、移動ユニットの位置・方向を推定する。
- アクチュエーションユニットコントローラに対して内部コマンドを送る。

これらの機能のうち、移動ユニットの移動経路生成と自動運転についてはその実現方法について次節で詳細に述べる。

移動ユニットの移動経路生成と自動運転の実現方法

本天井移動ロボットプラットフォームではロボット動作のための複雑な経路探索や走行制御が必要でないというのが一つの利点であるが、それでも完全に無計画では動作しないので一定のルールを決める必要がある。今回採用したルールは木構造マップを利用した経路生成法である。以降でこのルールについて述べる。

まず天井平面で交差点となる位置を適宜複数個選択する、この交差点を CrossPoint と呼ぶ。そしてこの CrossPoint 同士を連結し道を作成する。今回サンプルとして用意したマップを図 3.78 に示す。動作用天井は 2,000×2,000(mm) の広さを持ち4辺は枠に接し、また中心には吊り金具が存在するのでここに入り込むことができない。そこで 1,000(mm) の板の中心4点をまず基本の CrossPoint とし、その周辺に補助用のクロスポイントを2個ずつ配置した。

次にこのマップを利用した経路生成手順について述べる。経路生成においては、最終のゴール地点の座標および目標角度が与えられるものとする。

1. ゴール地点を設定し、現在の移動ユニットの位置を取得する。

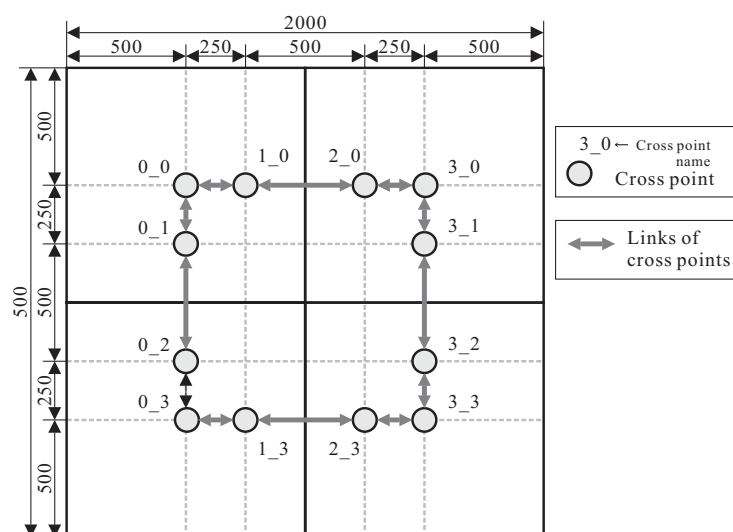


図 3.78: 移動ユニットの経路生成用木構造マップ

2. ゴール地点に一番近い距離にある CrossPoint を探しそこを GoalCrossPoint とする。
3. 移動ユニットの現在位置から一番近い距離にある CrossPoint を探しそこを CurrentCrossPoint とする。
4. CurrentCrossPoint を経路の配列リストに登録する。
5. CurrentCrossPoint に連結する CrossPoint を全て検索し、各 CrossPoint に移動した場合にゴール地点にどれだけ近づくかを計算する。
6. CurrentCrossPoint に連結する CrossPoint の中でもっともゴールに近づく CrossPoint を CurrentCrossPoint として登録する。
7. CurrentCrossPoint と GoalCrossPoint が等しい場合経路生成を終了する、そうでない場合 4 へと戻る。

最後にこの経路に沿って移動ユニットを自動運転させるコントロールについて述べる。今回移動ユニットの移動はシンプルな直進、右旋回、左旋回、停止の4つの組み合わせによって行う。自動運転の流れを次に示す。

1. 経路の配列より現在の位置、次のターゲットの座標を取得する。
2. 現在の位置および次のターゲットの座標より目標旋回角度を計算する。
3. 現在の方向および目標旋回角度より旋回方向を決定し旋回を開始する。
4. 現在の角度をアップデートし、その角度と目標旋回角度との差がある一定値以下であれば次に進む。そうでなければ3に戻る。

5. 直進を行う。このとき現在の角度と次のターゲットへの方向が一定値より大きい場合は旋回モードに戻るため2に戻る。
6. 現在の位置から次のターゲットまでの距離を計算する。
7. この距離が一定以内の場合、次のターゲットを調べこれが空の場合、次の最終旋回モードに行こうする。空でない場合1の旋回モードに戻る。
8. 現在の方向および最終目標旋回角度より旋回方向を決定し旋回を開始する。
9. 現在の角度をアップデートし、その角度と目標旋回角度との差がある一定値以下であれば停止し自動運転モードを終了する。そうでなければ8に戻る。

統合PC用プログラムの実装

3.5.4 節に挙げた機能を実現するためにできるだけ1クラス1機能となるように図 3.79 のようにクラス設計を行った。また Appendix.C に詳細な設計図を示す。今回は開発時間の関係上プログラミング言語に開発速度の速い JavaTM を採用した。ここで簡単に各ク

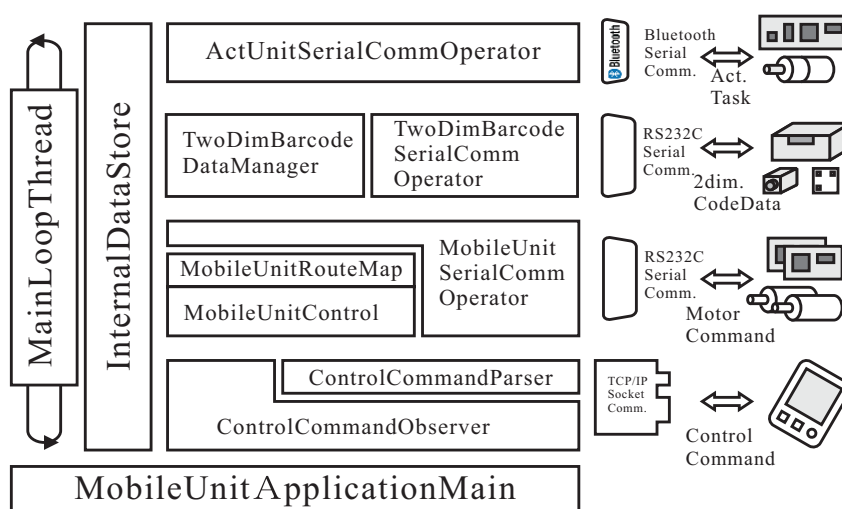


図 3.79: 統合PC用プログラムの簡易クラス設計図

クラスの機能について述べる。

- ”ApplicationMain”
基本的に全てのインスタンスを生成する main メソッドの存在するクラス。
- ”InternalDataStore”
内部データを全て保存しているクラス。全てのクラスがこのクラスのインスタンスを受け取りアクセス出来る状態にする必要がある。

- ”ControlCommandObserver” + ”ControlCommandParser”
独自のスレッドを持ち、TCP/IP ソケットのコネクションを行いコントロールコマンドの入力を監視する。ControlCommandParser はソケット経由で送られてきたコントロールコマンドを解釈し、必要に応じて InternalDataStore のインスタンスに緊急命令や各ユニットのサブタスクを書き込む。
- ”MobileUnitControl” + ”MobileUnitRoute Map”
コントロールコマンドに従い、マップ情報を参考に移動ユニットの動作経路を生成し、その経路に従い動作するよう現在の位置と目的位置から、移動ユニットの直進・旋回などの動作を決定する。
- ”MobileUnitSerialCommOperator”
InternalDataStore に保存されたモータコントローラへ送信すべきコマンドを読み込みシリアル通信経由で送信し、コマンド受信完了および Lock コマンド完了信号を受信する。
- ”TwoDimBarcodeDataManager” + ”TwoDimBarcodeSerialCommOperator”
2次元コードリーダとの通信および二次元バーコードデータのパーズを行うクラス。コードデータやコードの読み取り画素位置より移動ユニットの現在の位置・方向を推定する。
- ”ActUnitSerialCommOperator”
InternalDataStore に保存されたアクチュエーションユニットコントローラへ送信すべきコマンドを読み込みシリアル (Bluetooth) 経由で送受信する。

以上のようなクラス設計をもとに作成したプログラムの GUI 表示を図 3.80 に示す。この図において上側のメニューバーのみのフレームを用いることによってプログラムの内部状態を変化させることができる。また下側は移動ユニットに関するプログラムの内部データを描画するためのフレームである。

3.5.5 シンプルリモートコントローラの実装

移動ユニット上の統合 PC 用プログラムに対してコントロールコマンドを TCP/IP ソケット通信によって送信するために図 3.81 に示すような、シンプルリモートコントローラを作成した。このコントローラは

- 移動ユニットを手動で制御するコントローラ部
- 移動ユニット自動運転のゴール位置・角度の入力および現在の位置・角度表示部
- 移動ユニットが乗っている二次元コードマトリクスシート番号を設定する入力部
- クレーンユニットのマニュアル・自動動作を命令するためのコントローラ部

の4つのパートから構成されるプログラムである。

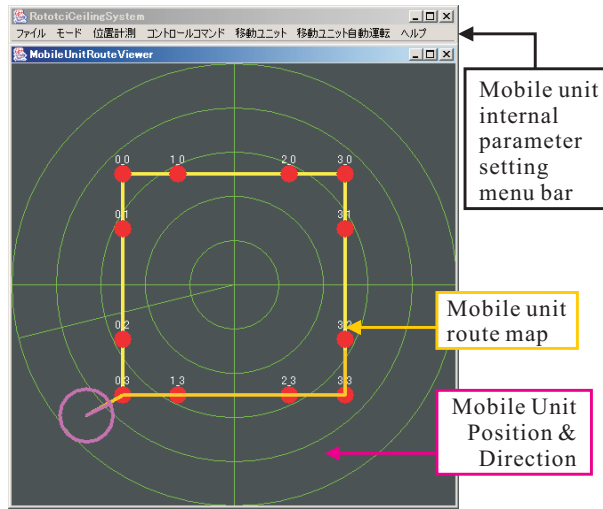


図 3.80: 統合 PC 用プログラムの実行時画面

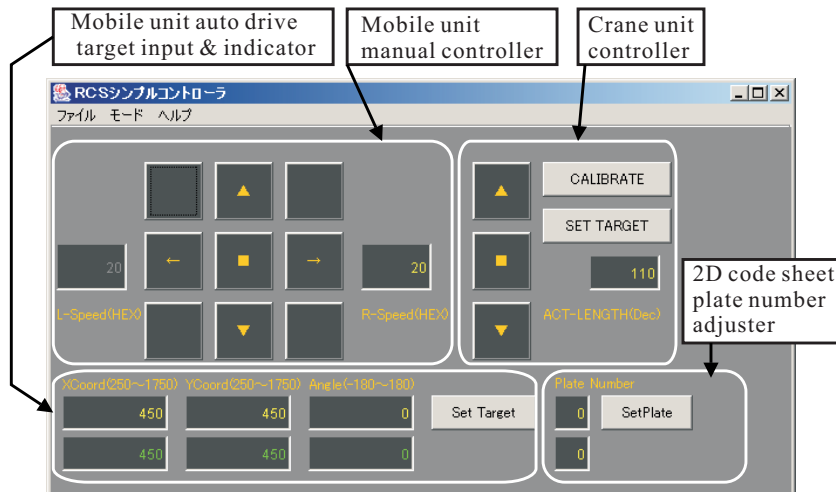


図 3.81: シンプルリモートコントローラの実行時画面

3.6 ロボット動作用天井の実装

ロボット動作用の天井としてはまず移動ユニットおよびリンクアップユニットの動作を確認するために床面より 500(mm) ほど浮いた小さなサイズの仮設天井平面を用意し基本的な動作の確認をした後に、ロボットの動作領域を広げアクチュエーションユニットも動作できるように人間の頭の高さより上に設置されたロボット動作用天井を作成した。以降でその詳細を述べる。

3.6.1 仮設天井平面の製作

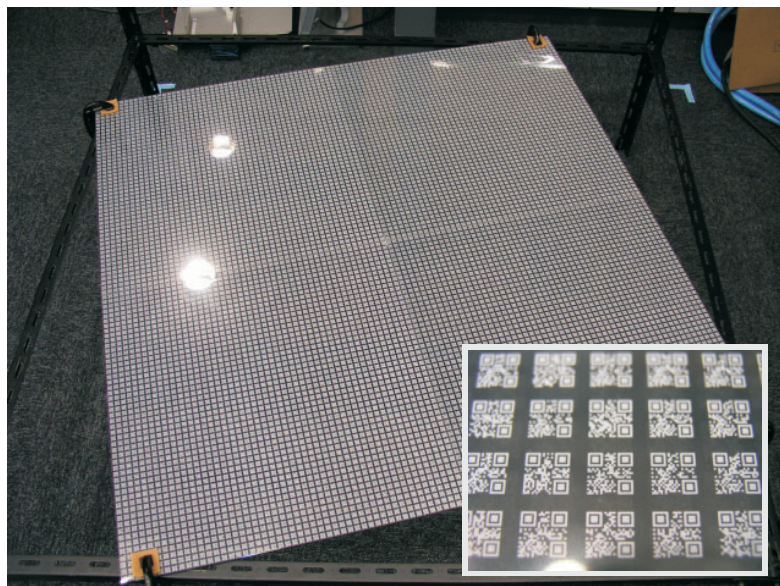


図 3.82: 仮設天井 (右下 : 印字された 2 次元バーコード)

移動ユニットおよびリンクアップユニットの動作を確認するために、図 3.82 のような仮設模擬天井を用意した。この天井は 1000mm×1000mm で厚さ 6mm の強化ガラスの上に 2 次元バーコードマトリクスを白色インクで印刷した透明シートならべ、さらにその上にシート保護用に 3mm 厚のポリカーボネート板を重ねたものである。

2 次元コードマトリクスのシートの作成は次のように行われた。まずコードデータに書き込む座標データ”X0000Y0000”～”X0049Y0049” が一行に 1 データ書き込まれたテキストファイルを出力する Java プログラムを作成し、次にこのテキストファイルを (株) デンソー・ウェブ製の 2 次元コード作成ソフト”QR Draw Pro” のライブラリ (DLL) を利用する VisualC++ プログラムに読み込ませて 50×50(個) のビットマップファイルを作成する。そしてこの合計 2,500 個のビットマップファイルを別のオリジナル Java プログラムによって 1 つの JPEG 画像として結合する。最後にこの JPEG 画像を市販のドロソフトによって PDF 形式に変換したものを印刷業者に印刷依頼をした。印刷業者では白色

インクを印字するためのマスクを作成し、シルク印刷のように透明フィルムに印字した後で紫外線を当てインクを固着させるという手法でシートの印字を行う。 以上のような手順で500×500 (mm) サイズの2次元コードが印字された透明シートを複数枚用意した。

2.3.7 節でも簡単に述べたが、今回の天井面を透明な素材で作成したのは

- 天井面上で動作している移動ユニットの様子を下方から確認できる
- 既存の天井の下側に取り付けられた場合にも照明設備をそのまま利用できる

というような二つの理由がある。

また強化ガラスの安全性に関しては、仮設天井設置の前に強化ガラスを4点自由端支持し、板の中心に60kgほどの重りを載せてみたところ10mm程度のタワミを示したものの亀裂等の問題はなく、大きな衝撃力を加えない限りは安全であることを確認してある。

3.6.2 ロボット動作用天井の製作・施工

次に仮設天井よりも移動ユニットの動作範囲を広げ、そしてクレーンユニットによる物理支援の実験も行えるように人間の頭上高さに設置できる天井面を用意した。施工された動作用天井を図3.83,3.84に示す。



図 3.83: RR3内に設置されたロボット動作用天井(下面より)



図 3.84: RR3内に設置されたロボット動作用天井(天井裏支持部)

今回用意した天井面は仮設天井平面で使用した3層式の天井平面を4つ用意して繋げたものでサイズは2,000(mm)×2,000(mm)である。このガラスを鉄材のL字フレームを組み合わせた枠にはめ込み、その枠をステンレスの構造材により支え、それらを従来より天井面に設置されたケーブルダクトにぶら下げることによって支えている。また強化ガラス同士はエポキシ系接着剤にて接着および段差の埋め合わせが行われており、表面保護用のポリカーボネート板も透明の梱包用薄型テープで接合されている。

第4章

プラットフォームの性能評価実験とその考察

4.1 吸着ユニット及びリンクアップユニットの性能確認実験

今回作成した天井上側の移動ユニットの重量は10(kgf) また実際にぶら下がるリンクアップユニット側の重量は8.2(kgf)であった。このリンクアップユニットの他に22.8(kgf)の負荷を直接吸着ユニット側に与えたときに天井からの落下が起こったので、全体としての吸着力は31(kgf)であり、これは各磁石モジュールの吸着力の総和40(kgf)より2～3割ほど小さいことになる。この原因は今回の測定がリンクアップユニットの両端を下方に引っ張ることによって行われたため、一部の磁石モジュールにはねじれの力が加わり、これが測定された吸着力の低下に繋がったと思われる。しかし吸着力約30(kgf)という値は今後下部に取り付けるアクチュエーションユニットの応用性を考えても十分な値だと思われる。また過負荷防止のためのコンストンであるが下部にコンストンの引張力と補助マグネットの吸着力以上の力(衝撃力)が加わったときには図4.1のようにコンストン以下の部分が下降して、吸着ユニットに過負荷を与えないことが確認された。

4.2 永久磁石誘導法による移動ユニット移動時のリンクアップユニットの誘導誤差評価実験

本実験では、天井上面の移動ユニットの移動に対して、天井下面のリンクアップユニットがどれだけの追従性能を示すかを計測することを目的とする。実際に仮設天井面を移動ユニットを走行させ、リンクアップユニットを追従させてみたところわずかにスティックスリップ現象を示すものの、静的な状態での位置のずれはほとんどなく、静的な誤差として確認されたのは磁石モジュールの位置決めによるものだけであり、そのオーダはサブミリ以下であることが確認された。これは機械加工・組み上げの公差に基づくものであり、現状での測定は困難であるので将来の課題とする。

そこでスティックスリップ現象による動的追従誤差を計測する実験を行った。

実験は図4.2のようにワイヤタイプのリニアスケールをワイヤが平行となるように注意して各ユニットに取り付け、移動ユニットを一定速度で走行させたときのパルスをカウン



図 4.1: 過負荷防止機能の動作

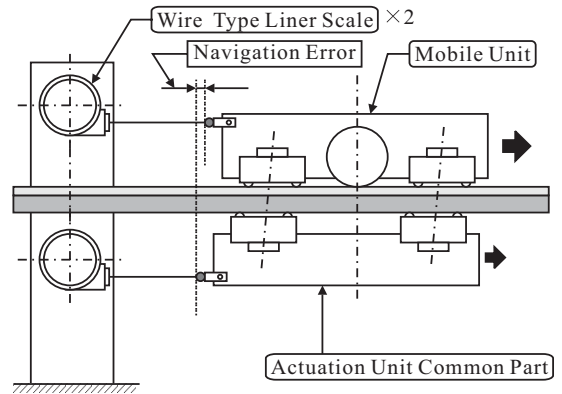


図 4.2: スティックスリップ現象による追従誤差計測実験のセットアップ

トすることによって行った。使用したリニアスケールの外観を図 4.4 に、その基本スペックを表 4.3 に示す。また 2 系統のパルスカウンタは移動ユニットのモータコントローラやクレーンユニットコントローラでも使用されている、秋月製の H8-3052 ボードを用いて行った。サンプリングレートは 100Hz である。

図 4.5, 4.6 に実験の結果を示す。グラフを見ると移動ユニットの速度を 15(mm/sec), 30(mm/sec) と設定した時の両方とも動的な誤差が最大 1mm 程度でありこれは移動の様子から推測される誤差の範囲内であった。この動的誤差 1(mm) という値は下部に連結されるアクチュエータがクレーンユニットのように静止位置が重要であるユニットの場合は特に問題とはならないが、たとえばハンドタイプのアクチュエータによる物体の把持のように移動経路が重要となるようなユニットの場合は十分小さい誤差とは言いがたい。これについては改良点も含めて後の将来課題で述べる。

図 4.3: 追従誤差実験で用いたリニアスケールの仕様

製造販売元	マイクロテック・ラボラトリー(株)
型番	MLS-30-4500-1000
測定距離	1,000 (mm)
ストローク速度	1,000 (mm/sec)
最小分解能	0.02 (mm)
絶対精度	+0.05/100 (mm)
ワイヤ引張力	1.4 ~ 2.9 (N)



図 4.4: 追従誤差実験で用いたリニアスケール

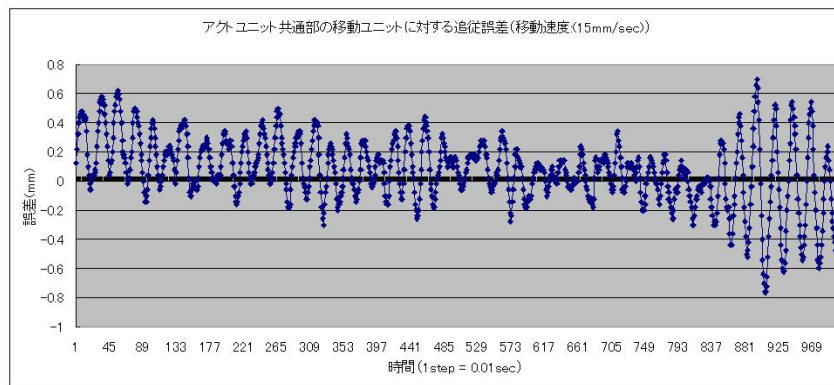


図 4.5: 移動ユニット動作時のリンクアップユニットの追従誤差 (移動速度 15mm/sec)

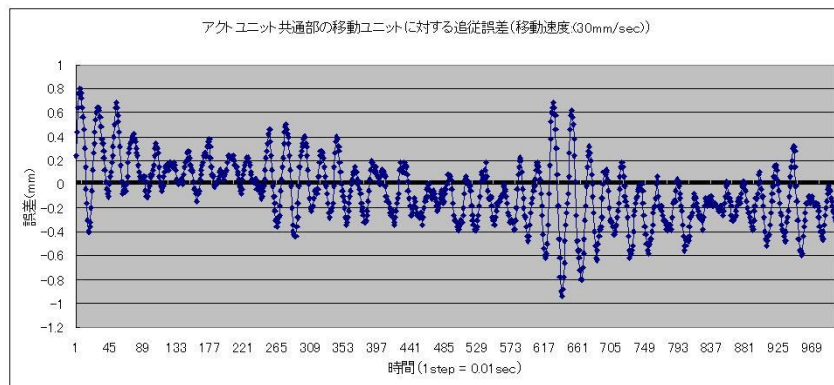


図 4.6: 移動ユニット動作時のリンクアップユニットの追従誤差 (移動速度 30mm/sec)

4.3 2次元コードマトリクスによる移動ユニットの自己位置認識機能の性能評価実験

本実験では移動ユニットを30度刻みで旋回・停止させ、停止した位置での2次元コードデータからの推定位置・角度のばらつきを評価する。実験の結果を表4.1に示す。この結

表 4.1: 2次元コードによる移動ユニットの位置推定のおけるばらつき評価実験の結果

設定角度	X方向標準偏差	Y方向標準偏差	角度標準偏差
180	0.18	0.14	0.67
150	0.17	0.22	0.27
120	0.017	0.017	0.15
90	0.12	0.028	0.11
60	0.57	0.038	0.23
30	0.014	0.010	0.12
0	0.012	0.0092	0.092
-30	0.14	0.32	0.17
-60	0.22	0.024	0.20
-90	0.15	0.027	0.30
-120	0.024	0.045	0.36
-150	0.032	0.045	0.21

果によるとX Y方向の位置の最大標準偏差が0.57(mm)で角度の最大標準偏差が0.67(度)となっている。この値は生活環境内で動作する移動ロボットの位置角度計測においては十分小さい値であると言え、この実験により、本手法を用いることでばらつきが少なくロボットの位置・角度を計測できることが確認された。

また今回は移動ユニット単体のみ自己位置認識機能を実装しただけであるが、この方法は2.2.3にも述べたように各ロボットが自律的に自己位置を入手するものであり、本機能を複数台のロボットに応用することは容易であり、この実験により本論文が提案する複数台ロボットの同時位置計測手法の有効性が確認されたと言える。

4.4 クレーンユニットの動作確認実験

クレーンユニットの動作を確認する実験を行った。2,000(mm)のストロークを停まらずに上昇または下降を行かせたところ上昇時は21~22(sec)、下降時は16~17(sec)ほど時間を要した。このことより2,000(mm)のストロークを上下動するのに40(sec)以内であり、クレーンユニットは設計仕様の伸縮速度100(mm/sec)を満たしていることが確認された。

また高さの位置決め精度であるが、今回は巻き上げをスチールベルトとプーリを用いた機構によって行っているため、ワイヤの巻きあげに比べるとプーリ回転数と伸縮長さは比例関係にあるものの、プーリにおけるスチールベルトの重なりによる高さのずれが生じる

ことがわかった。この測定は精度のよい測距計が必要となるので今後の課題とし、今回はある指定高さへの移動を行ったときの再現性を確認するだけにとどめた。繰り返し実験の結果、2,000(mm) のストロークにおいて 500(mm) おきに 4 点の再現性をステンレス製の定規を用いて確認したところその誤差は 1(mm) 以内であることが確認された。

4.5 物体搬送デモ実験

移動ユニットの自動運転とクレーンユニットの伸縮を組み合わせることで物体搬送を模したデモ実験を行った。図 4.7 にその様子を示す。この図は左上から右に進むほど時間が経過しており、移動ユニットの移動部分はおよそ 10 秒に 1 コマで画像をサンプリングしており、クレーンの伸縮については 2 秒に 1 コマほどでサンプリングしてある。この実験により本天井移動ロボットプラットフォームの構成要素を統合することにより簡単な物体搬送が行えることが示された。

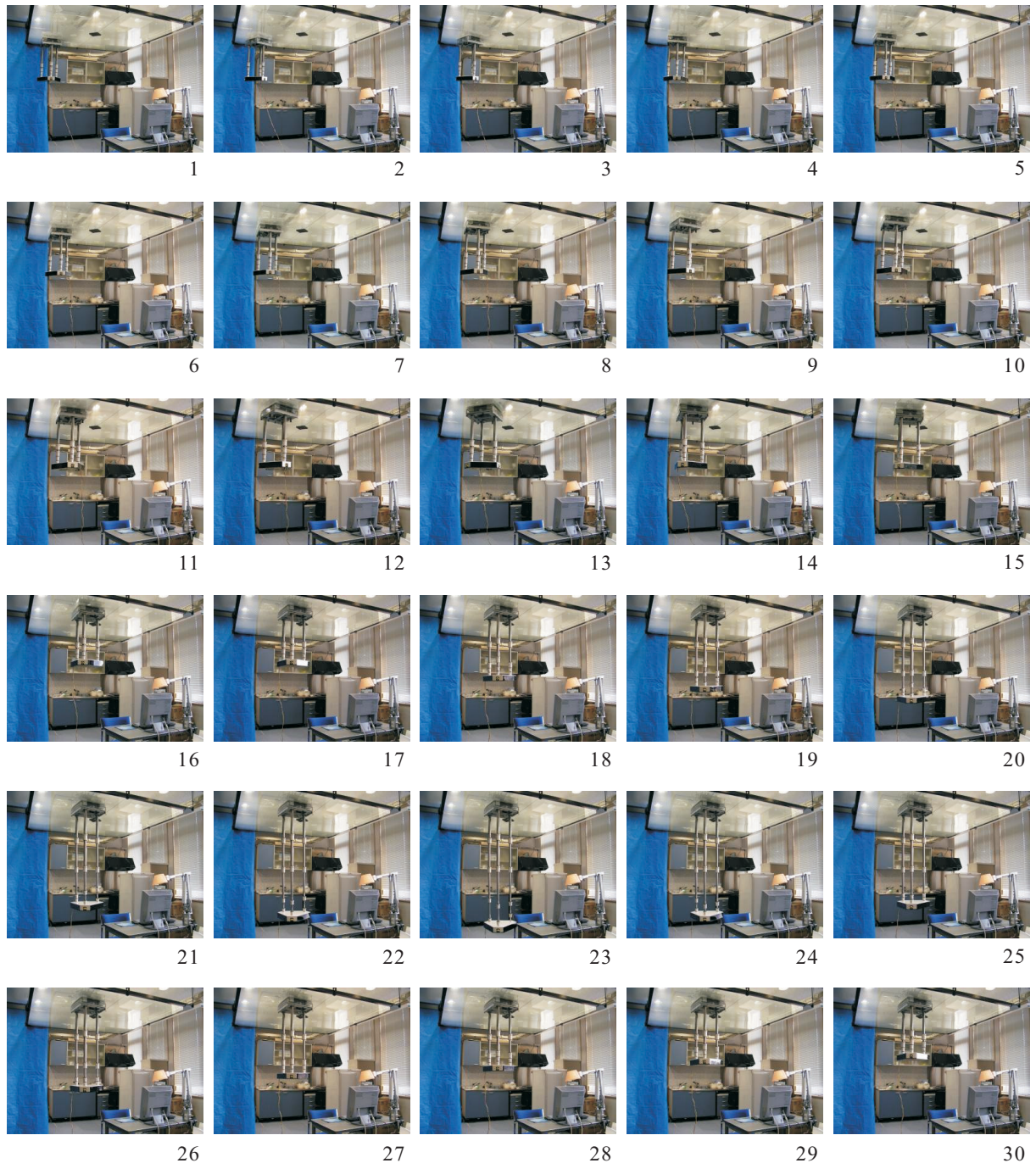


図 4.7: 移動ユニットの自動運転とクレーンユニットの伸縮動作を組み合わせた実験

第5章

天井走行ロボットのアプリケーションの提案

本章では本研究において構築されたプラットフォームの将来像を考えて、応用的なアプリケーションを提案する。

今回提案するのは

- 天井からの音や光で部屋の演出を行う「動的空間演出システム」
- 天井裏を収納空間として利用する「天井収納管理ロボットシステム」

の二つである。以降でそれぞれについて具体的に述べる。

5.1 動的空間演出システム

天井移動ロボットでは全てのロボットが（ロボット以外の）障害物に邪魔をされず移動・動作することが可能であることを生かし、現在の部屋に設置されている音響設備、画像設備などを天井面に移動させ、尚且つそれらの配置を動的に変化させることを考える。図5.1に動的空間演出システムのイメージを示す。本アプリケーションは従来のテレビの役割を発展させ情報を映し出すプロジェクタユニット、部屋内の光の調整を行うライティングユニット、音響の出力・管理を行うサウンド&スピーカユニットから構成される。これらが組み合わさることにより、ユーザの好み・状態に応じた空間演出が行えるようになる。具体的なコンテンツとしては現在流行しているホームシアターの機能を拡張させてより現実感のある映画鑑賞が行える、パソコンの画面をより臨場感あふれる状態で楽しむ、人間の就寝に合わせてライティングや音響のレベルを調節し快適な睡眠を実現する、プラネタリウムのように現実では見ることのできない景色を音とともに表現することで高いヒーリングの効果を実現する空間を提供できるなどが挙げられる。

また従来はテレビや音響設備はある位置から鑑賞することが求められていたため、部屋の中でもそれぞれの場所に固定した“使われ方”というのが決まっていた、しかしこのように映像や音響自体の発生元が移動できるようになると、部屋の使われ方の自由度が高くなり、その部屋にいる人数やその時間帯の部屋の使用目的に応じてレイアウトが変更されるといった選択性が生まれてくるものと思われる。

5.2 天井収納管理ロボットシステム

天井空間が人間が平常時では使用しない空間であるということを利用したのが、今回のプラットフォームの特徴であるが、この考えをさらに発展させると天井空間をさらに有効に利用しようという考えが出てくる、その有効利用の方法の1つが物品の収納ということになる。毎日のように頻繁に使用する物品であれば人間の手の届くところにおいてあるほうが便利であるが、利用頻度がそれほど高くないものに関しては専用の収納スペースにしまうのが一般的である。この収納スペースは広さという意味でもまた配置という意味においても、人間の生活空間と同じレベルの空間である必要はない、そこで収納スペースを天井裏に設け、そこからの取り出しや人間への受け渡しを天井移動ロボットに行わせるというのが本アプリケーションの意図である。天井収納管理ロボットシステムのイメージを図5.2に示す。このアプリケーションは天井裏で荷棚を整理する棚管理ロボットと、荷物の受け渡しを行うクレーンロボットの2種のロボットから構成される。このシステムの実現により、従来の生活空間の利用法より効率のよい空間利用ができるため、ある地点に定置される物品が少なくなりフリースペースが広がることが期待される。これは人間との直接的なコンタクトを主目的とするロボットにとっては動作領域の拡大という意味で非常に重要なことであると考えられ、このアプリケーションが他のロボットの動作の拡張に繋がることを意味している。またこのアプリケーションの実現のためには、各物体のプロパティをロボット側が認識する必要があり、そのためにはタグ技術が必要となる。この技術としては”RFID”などの非接触式のタグ技術の開発が重要である。

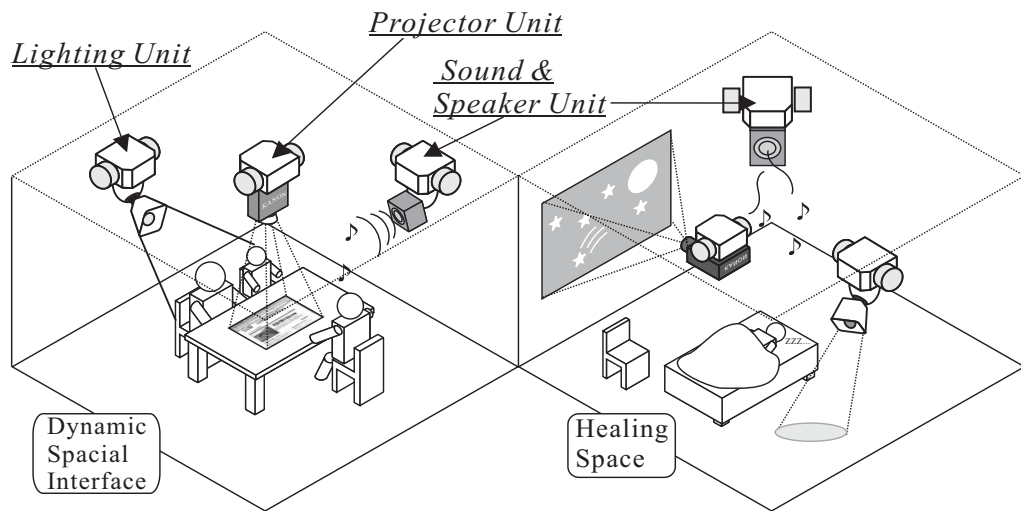


図 5.1: 動的空間演出システムのイメージ図

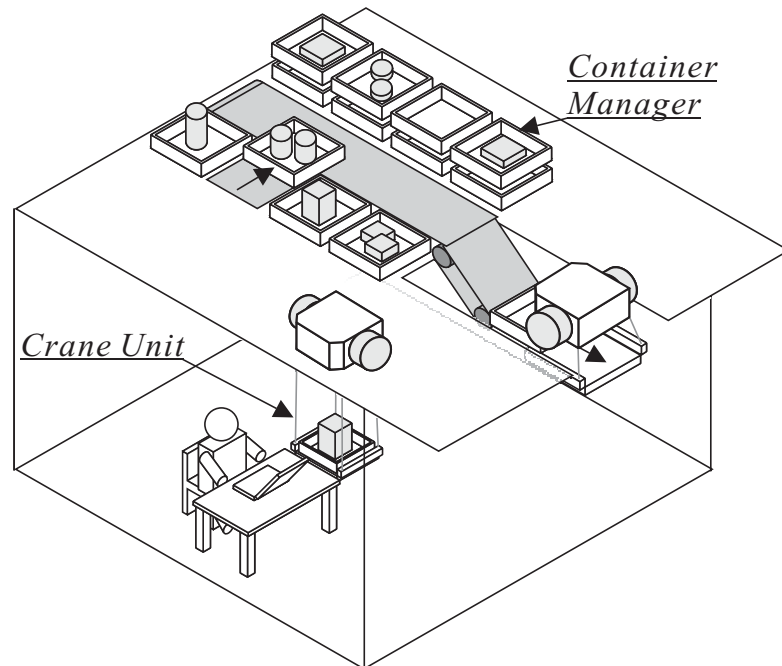


図 5.2: 天井収納管理ロボットシステムのイメージ図

第6章

結論

6.1 総括

本論文では "知的生活空間"における人とロボットの空間の取り合いにおける干渉問題の解決と、ロボットによるさりげない支援の実現を目標とし、磁石誘導型天井移動ロボットプラットフォームを提案、構築しその有効性について述べた。

本プラットフォームの特徴は、ロボットの天井懸架手法として生活環境中で複数台のロボットが自由度高く動作するのに適した "永久磁石誘導法"および複数移動ロボットを同時に動作させるための "2次元コードマトリクス"を用いた複数ロボットの同時位置計測手法の2つである "永久磁石誘導法"は天井板をはさんで永久磁石を対向させ、上側の磁石を移動ロボットによって牽引させることにより下の磁石を誘導し、その磁石にぶら下がるアクチュエータを移動させるというものである。

また "2次元コードマトリクス"を用いた複数ロボットの同時位置計測手法は空間の知能化という概念にもとづき、動作領域の天井面上に座標データの書き込まれた2次元コードを敷き詰め各ロボットがそのコードを読み取ることで自らの位置を推定するというものである。

以上二つのコア技術を組み込み構築したプラットフォームは次の要素から構成される。

1. ロボットが天井面を動作するためのコア要素となる吸着ユニット
2. 天井上面で2次元的に移動(走行)する移動ユニット
3. 天井下面で吸着ユニットに吊り下がり、下部に様々なアクチュエータを連結させるリンクアップユニット
4. リンクアップユニットに連結し天井下面にて人間にアクセスをし支援を行うアクチュエーションユニット(クレーンユニット)
5. 移動ユニットおよびアクチュエーションユニットを制御するコントロールネットワーク
6. ロボット動作用天井

各構成要素の必要機能とその実現・実装方法について簡単にまとめる。

1. 吸着ユニット

吸着機能：磁石としてネオジウム鉄ボロン系の永久磁石を用い7.5(kgf)の吸着力を実現、また磁路ループ・非ループ切替機構を備えることにより吸着・脱着を切り替えることが出来る。

2. 移動ユニット

移動機能：車輪対向型機構による直進およびその場旋回ができる。

自己位置認識機能：車体に転送データを一部改造した2次元コードリーダを搭載し2次元コードの読み取りにより車体の位置・角度を推定することが可能である。

3. リンクアップユニット

連結機能：スライド式機構によりスムーズな連結が行える。

過負荷防止機能：定荷重バネを用いることにより吸着ユニットへの負荷を一定以下に抑えることが可能。

4. アクチュエーション(クレーン)ユニット

伸縮機能：ステンレスパイプ、リニアブッシュ、スチールベルトによるタケノコ型伸縮機構により安定した伸縮と荷台の保持・位置決めが可能である。

環境認識機能：複数の超音波センサによる障害物の検知が行える。

。

5. コントロールネットワーク

命令伝達機能：ネットワークを3層に階層化し、うち下位2層を実装した。コントロールコマンド層では統合PCソフトウェアの実装によりTCP/IP経由での動作指令を受付ることができ、インターナルコマンド層では移動ユニット用モータコントローラとクレーンユニットコントローラを実装し、シリアル通信による動作の指定が行える。

6. ロボット動作用天井

強化ガラス、2次元コードマトリクスシート、表面保護用樹脂の3層構造からなる広さ2,000×2,000(mm)の動作天井を実装した。

以上のような本プラットフォームの構築および性能評価実験により "永久磁石誘導法" を用いると天井上面の移動ユニットの移動により天井下面のリンクアップユニットおよびアクチュエーションユニットを静定な誤差がほとんどなく誘導することができ、生活環境内で鉄材などの特別な材料ではない天井面を複数台のロボットを2次元的に自由に動作させるのに有効であることを示し、"2次元コードマトリクス" を用いた位置計測手法では計測のばらつきの評価において位置の最大標準偏差が0.57(mm)、角度の最大標準偏差が0.67(度)とばらつきが少なく安定してロボットの位置を推定することが可能であり、生活空間において複数台のロボットの位置を同時に確実に誤り少なく取得するために本手法が有用であることを示した。そして応用実験として本プラットフォームによる物体搬送デモ実験を行い、人のリクエストにより物体を手元まで "さりげなく" 届けるという物理支援の有望性を示した。最後に本プラットフォームの将来像として動的空間演出システムと

天井収納管理ロボットというアプリケーションを提案し、それらがもたらす人間生活の変化の可能性について述べた。

6.2 将来課題

本研究を通して見出された将来課題を次に述べる。

- 永久磁石誘導法における動的誘導誤差の改善
実験の章で述べたとおり本研究において実装された磁石モジュールを用いた永久磁石誘導法の実現においては、ロボットの誘導に静的な誤差はほとんど含まれないものの、スティックスリップ現象による動的誤差が含まれてしまう。この動的誤差により軌跡を重要とする物体搬送など実装できないアクチュエータ動作が考えられるため、この誤差を低減させる手法を考案することが必要となる。現在この解決案として考えられるのが磁石モジュールを天井面に対し垂直よりわずかに傾けることにより、対向する磁石モジュールのわずかなずれからでも大きな牽引力を発生させるという方法である。この方法の実装とその性能評価が今後の課題として挙げられる。
- アクチュエーションユニットのバリエーションの増強
本論文では物理支援型アクチュエーションユニットとしてクレーンユニットを実装した。しかし、さらなる物理支援のためには物体把持を行うことが必須でありこれを担うアームもしくはハンドタイプのアクチュエーションユニットを開発する必要がある。またアプリケーションの提案で述べた動的空間演出システムを実現するためにはプロジェクタユニット、ライティングユニット、サウンドユニットなどの情報支援型のアクチュエーションユニットの開発が必要となる。またプロジェクタユニットに関しては Appendix.D にその概要を述べる。
- Robotic Room 3 の他ロボットとの連携による物理支援の実現
本論文ではプラットフォームの中で閉じた物理支援実験を行ったに過ぎない。より応用的な支援を行うためには、机上の物体把持を行うマニピュレーション台車やロボティックソーサなどとの連携を行う必要がある。このためには各ロボットがロバストに動作することが求められるのはもちろんのこと、各ロボットを統合的に管理する制御システムが必要となる。このシステムにとって各ロボットはできるだけ統一的に扱えることが好ましく、制御フォーマットの統一化を行い、本プラットフォームのインターフェイスもそのフォーマットに準じたものをしていくことが今後の課題となる。

付録 A

ハードウェア計画図

製作したハードウェア計画図をこの論文の最後に附す。

図 A.1: 磁石モジュール 1 号機, 1 号機改良版計画図 (図版: 03RF01000)

図 A.2: 磁石モジュール吸着力測定用台計画図 (図版: 03RF02000)

図 A.3: 磁石モジュール 2 号機計画図 (図版: 03RF01C00)

図 A.4: 移動ユニット計画図 (図版: 03RF03000)

図 A.5: リンクアップユニット計画図 (図版: 03RF04000)

図 A.6: クレーンユニット計画図 (図版: 03RF05000)

付録B

回路関連資料（回路図・ピンアサイン図）

B.1 移動ユニット用電源&シグナル信号分配基板

図 B.1 にコネクタのピンアサイン図を示す。

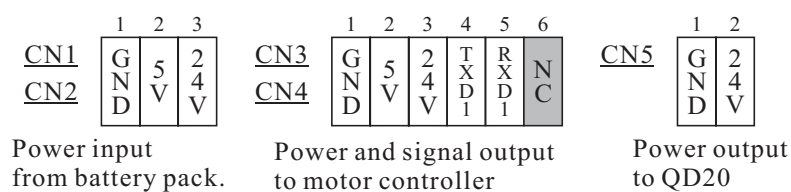


図 B.1: 移動ユニット用電源&シグナル信号分配基板

B.2 移動ユニット用モータコントローラ

移動ユニット用モータコントローラはH 8のピンを各コネクタに割り振っているだけなので回路図は示さず、コネクタNOおよびピンアサインを図 B.2、B.3 に示す。

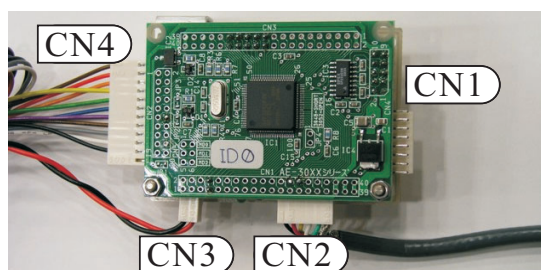


図 B.2: 移動ユニット用モータコントローラコネクタNO図

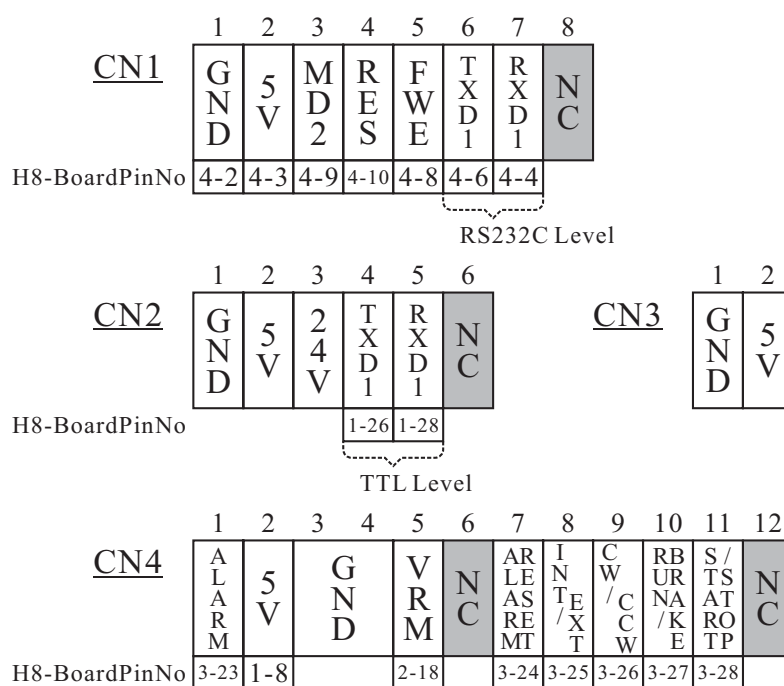


図 B.3: 移動ユニット用モータコントローラのピンアサイン図

B.3 クレーンユニット用コントローラ

クレーンユニット用コントローラは3.5.3に記した通り次の3個の回路から構成される。

- クレーンマザー回路
- Hブリッジ回路
- シリアル無線回路

以降で、クレーンマザー回路に関してはピンアサイン図を残りの二つに関しては回路図を示す。

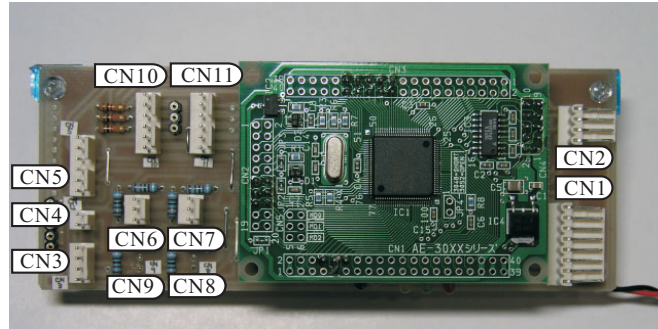


図 B.4: クレーンユニット用マザー回路コネクタNO図

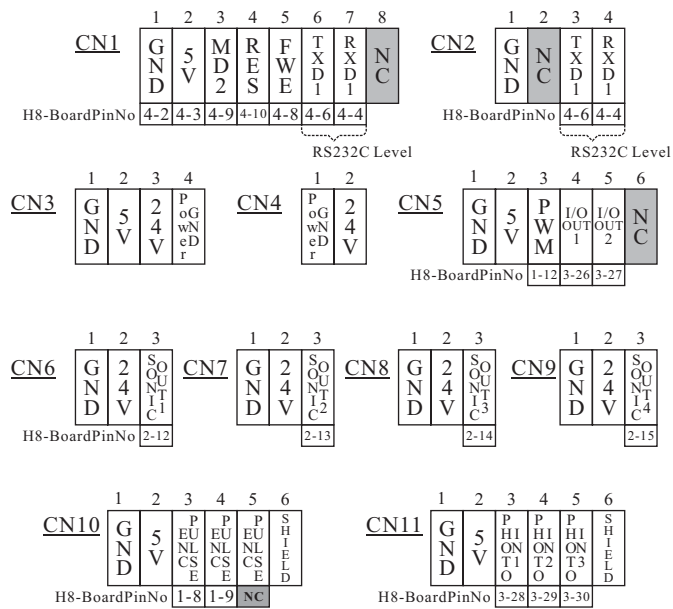


図 B.5: クレーンユニット用マザー回路のピンアサイン図

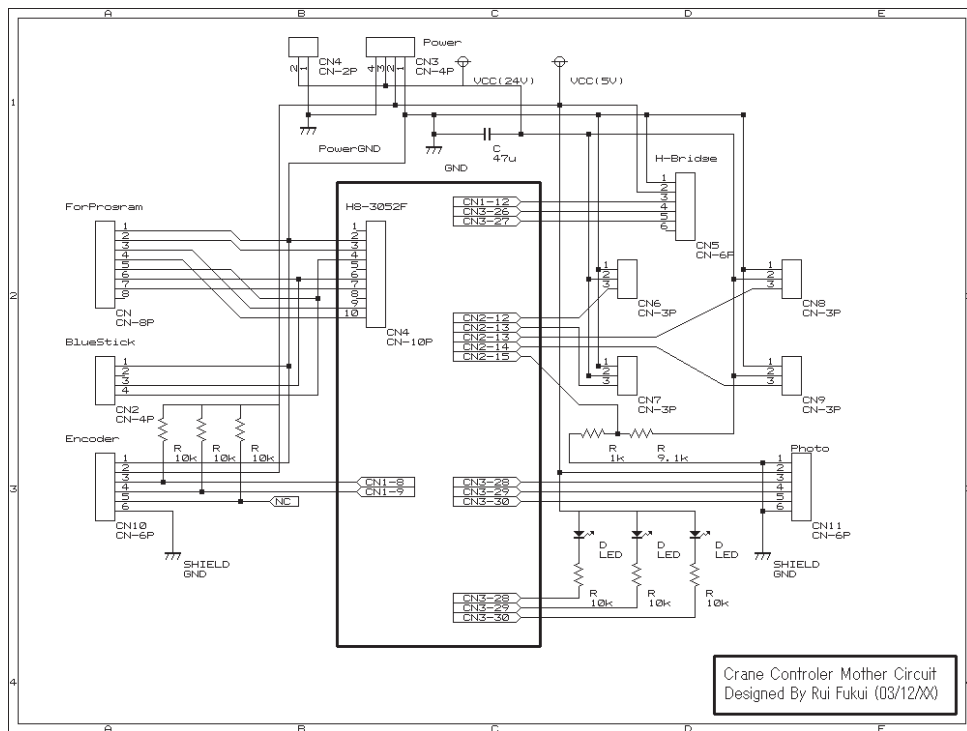


図 B.6: クレーンユニット用マザー回路基板回路図

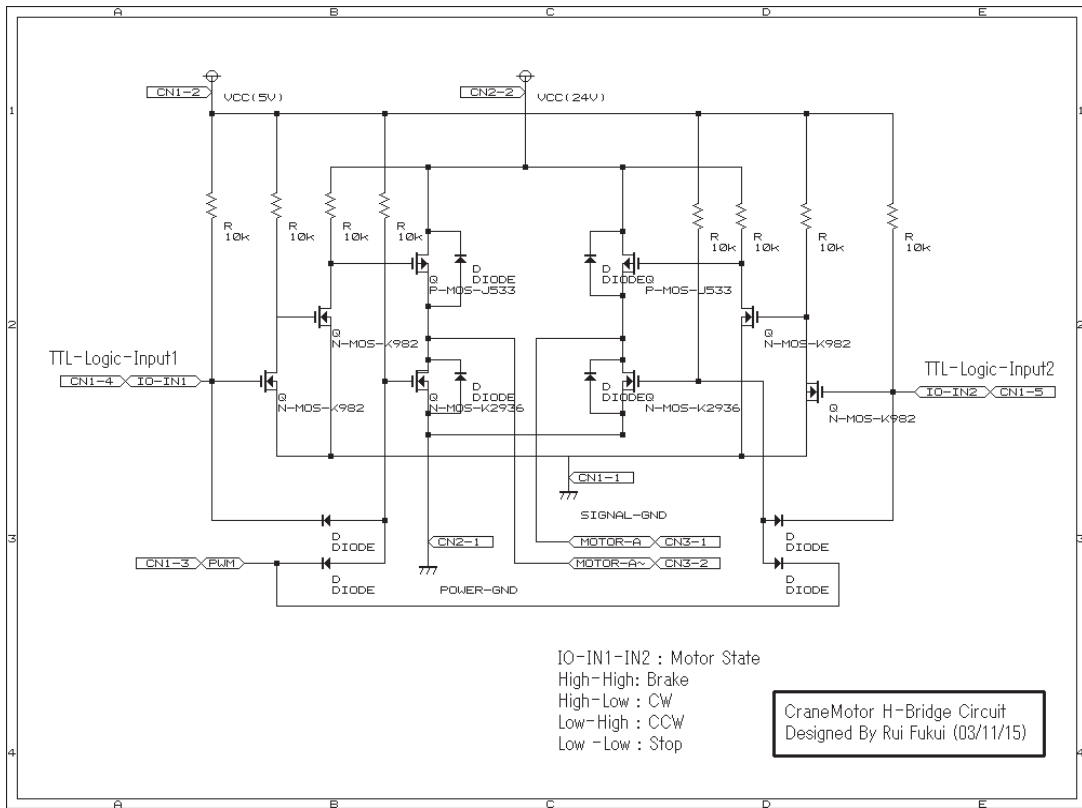


図 B.7: クレーンユニット用Hブリッジ回路図

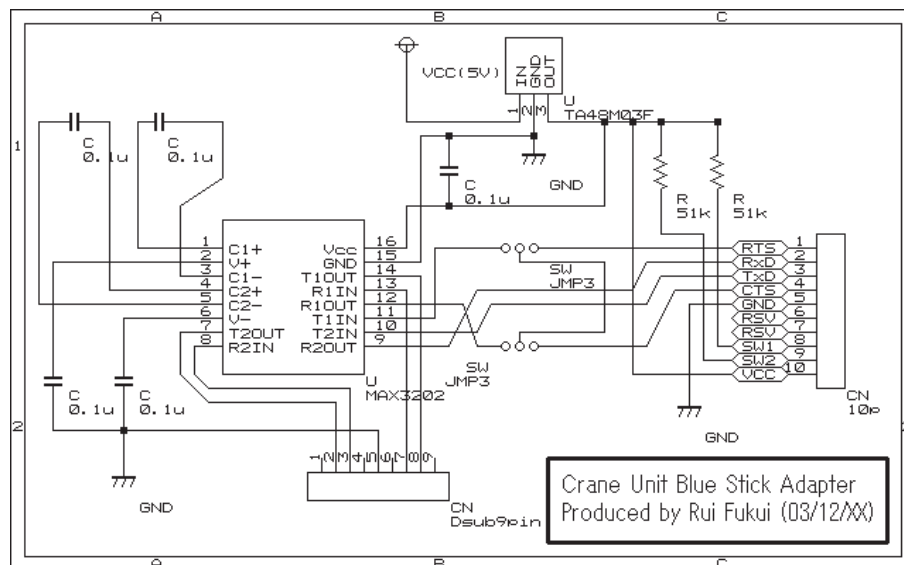


図 B.8: クレーンユニット用無線基板回路図

付録 C

統合 PC 用ソフトウェア設計図

製作した統合 PC 用ソフトウェア設計図をこの論文の最後に附す。

図 C.1: 統合 PC 用ソフトウェア設計図

付録D

情報支援型アクチュエーションユニット (プロジェクタユニット)の基本設計

本プラットフォームのアクチュエーションユニットとして、今回作成した物理支援型のクレーンユニット以外にも図D.1に示すようなプロジェクタユニットの作成も検討していた。モータ選定などの基本設計は終わっていたものの、内部パラメータをコンピュータから操作できるプロジェクタの選定などに時間がかかり実際には作成することができなかったため、ここでその概要を述べる。本プロジェクタユニットは情報支援型のアクチュエー

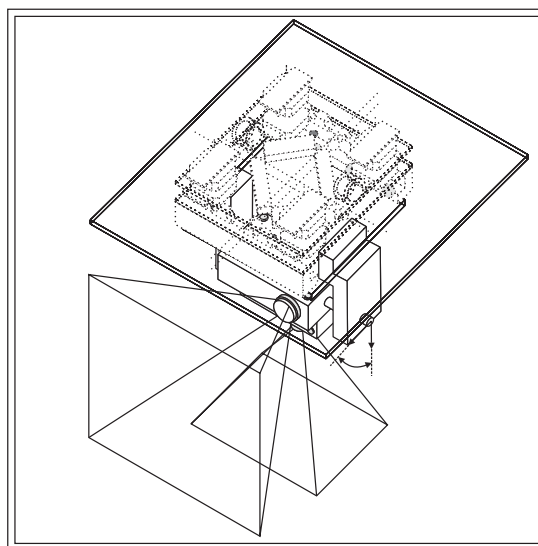


図 D.1: プロジェクタユニットのコンセプトスケッチ

ションユニットである。既存の光学プロジェクタに1自由度の首振り機構をつけ、この自由度と移動ユニットの自由度によって投影場所を変化させる仕組みである。このプロジェクタユニットは5章のアプリケーションでも述べたように動的な空間演出のために有効であると考えられる。本ユニットのような物理支援とは異なるアクチュエーションユニットを追加していくことも本研究の展望として重要である。

参考文献

- [1] 唐立新, 油田信一. “全方位画像列と移動量の記録による移動ロボットの教示再生ナビゲーション” 日本ロボット学会誌 Vol.21 No.8, pp.883~892, 2003.
- [2] G. Appenzeller, J.-H. Lee, and H. Hashimoto. “Building topological maps by looking at people: An example of cooperation between intelligent spaces and robots” *Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems, Grenoble, France, November 1997.*
- [3] Rui Fukui, Hiroshi Morishita, Tomomasa Sato. “Expression Method of Human Locomotion Records for Path Planning and Control of Human-symbiotic Robot System based on Spatial Existence Probability Model of Humans” *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.4178-4184, 2003*
- [4] 鈴木真、鈴木祐介、大橋晃太、正宗賢、土肥健純、矢野英雄. 「天井走行型ロボットアームによる高齢者の自立移動支援システムの研究 (第一報)」 精密工学会誌 第5巻第1号, pp.116-120, 1999
- [5] 八木昭彦他「天井走行型ロボットアームによる高齢者の在宅自立生活における工学的支援に関する研究」第41回日本エム・イー学会大会抄録・論文集, pp.191, 2002
- [6] Shigeo Hirose, Kazuyoshi Kawabe “Ceiling Walk of Quadruped Wall Climbing Robot NINJA-II” *Proc. 1st Int. Symp. CLAWAR 98, pp.143-147 (1998)*
- [7] Victor Scheinman. “ROBOTWORLD: A Multiple Robot Vision Guided Assembly System” *In Proceedings of the 4th International Symposium on Robotics Research, 1987.*
- [8] John F. Canny, Kenneth Y. Goldberg. ““RISC” for Industrial Robotics: Recent Results and Open Problems” *In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Diego, CA. May 8-13, 1994.*
- [9] 染谷美枝他「天井吊り下げ型自由移動装置の開発に関する研究 - 天井面移動機構の明かり取り天井面上の走行特性 - 」, 第16回日本ロボット学会学術講演会, pp.215-216, 1998
- [10] 佐藤知正, 西田佳史, 溝口博. “ロボティックルームに関する研究”, 第17回ロボティクス・メカトロニクス講演会 '97 講演論文集, pp.913-918, 1997

- [11] 森武俊, 吉本諭治, 佐藤知正. "人間行動記述のための分散センシングシステム", 第17回日本ロボット学会講演会, pp1163-1164, 1999
- [12] Hiroshi Noguchi, Taketoshi MORI and Tomomasa Sato. "Network Middleware For Utilization of Sensors in Room", *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.1832-1838, 2003
- [13] Hiroshi Morishita and Rui Fukui and Tomomasa Sato. "High Resolution Pressure Sensor Distributed Floor for Future Human-Robot Symbiosis Environments", *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.1246-1251, 10 2002
- [14] 鶴清他「新しい密閉型IBマグネットと磁気吸着全方向移動型ロボットの開発」, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 '02 講演論文集, 1P1-H05, 2002
- [15] 大川 光吉「永久磁石磁気回路入門 ~マグネティクスのA・B・Cと演習~」, 総合電子リサーチ (ISBN:4-915449-73-4)
- [16] 谷腰 欣司「磁石とその使い方 種類・特徴・選び方」, 日刊工業新聞社 (ISBN:4526046337)
- [17] 俵 好夫, 大橋 健「希土類永久磁石」, 森北出版 (ISBN:4627736215)
- [18] 福井 類 (指導教官 佐藤 知正)「卒業論文 - 生活環境ネットワークルームにおける移動台車システムの構築に関する研究」2001年度 東京大学工学部機械情報工学科 卒業論文

謝辞

本研究を進めるに当たり、多くの方々にご支援ご協力を頂きました。この場にて感謝の意を表し、謝辞を述べさせて頂きたいと思います。

佐藤知正教授には学部3年の機械工学ゼミナールのときより3年以上もご指導を頂きました。学部生のときより継続してきた“モノづくりを”やりたいという希望を快く承諾していただき、自分のさまざまな（わがままを含む）自由な行動を容認してくださいました。そしてまた研究者として、2歩先に行く重要性を示してください同時に2歩先の“夢”を持ち、その夢を実現することを熱く語って下さいました。そして論文を含む自分の行った研究作業の意味づけにおける議論では学生相手だと手を抜くことなく真剣に意見を述べ、また真剣に意見を聞いて頂きました。ひとまずこの修士の研究を終えると社会人として世の中に出ることになるわけですが、佐藤先生の教えを胸に抱き、自分の夢を忘れることなく精進を続けたいと思います。そしていつの日かエンジニアとしてもマネージャとしても成長した自分の姿を見ていただきたいと思います。3年と半年の間大変お世話になりました。ありがとうございました。

森武俊助教授とは自宅の最寄駅が同じということもあり、幾度か登下校の途中で研究に関する事関係しないこと様々な話を聞かせていただく機会がありました。僕が学部生の時の講師から助教授になられますますお忙しくなられたのにも関わらず、633号室に伺ったときには快く質問に答えていただきました。自分の研究内容のほとんどが機械設計だったため直接の技術アドバイスを頂くチャンスはそれほど多くはなかったですが、今度機会がありましたら是非森先生のD論の研究などについても裏話を含めて聞かせていただけたらと思います。研究科の中でも若手ということで（本当に）雑多なお仕事もたくさん回ってきているようですが、お体に気をつけていつまでも若々しい姿でいらして下さい。

3年半お世話になりました。ありがとうございました。

（有）HMIの森下さんには学部の卒業論文の時から機械設計および電気回路設計を含む“モノづくり”の基本をご指導いただきました。自分の手作業で工作をする“お遊び”とは異なる本当のモノづくりを体験できたことは自分にとって大変貴重な体験であり、これからエンジニアとして生きていく自分にとって、とても大切な時間であったと思います。ICRAの論文作成においては夜中まで論文の直しに付き添っていただき、提出後真夜中に食べたラーメンの味は忘れられません。また松戸の花火大会にもお誘いいただいた時の、お手製のたこ焼きの味など楽しく（結構無茶な？）思い出がたくさんです。

そして自分が就職先について迷いを感じているときに「やりたいことが重要（お金は二

の次)」とおっしゃって頂き迷いが晴れ、今の進路を決めることができました。これからはよいよ本職のエンジニアとして仕事をし始めますが、これまでご指導していただいたことを生かし一日でも早く一人前のエンジニアとなれるよう頑張ります。そして自分も”師匠”として後輩の指導ができるようになれるよう精進します。3年間本当にありがとうございました。

助手の中村さん、技官の田中さんには、学会出張の手配から秋葉原の現金購入の手続きなど様々な面倒な手配をしていただきありがとうございました。学部生の時は同じ部屋の住人として接する機会も多かったのですが、修士になってからは自分が2号館に来てからはなかなか話すことが出来なかったのが残念です。

助手の原田さんにはことあるごとに”イジッテ”いただき、ストレス解消のお手伝いできて光栄です。自分がゼミ生のときは博士課程で若々しかった原田さんが助手になられてから日に日にやつれていき、そして結婚してからは今までひくことのなかった風邪をひかれるようになってしまうその心労はお察しします。今度よかったらきれいにお皿を洗う方法をお教えします。冗談はさておき、研究においてはいつも真剣にそして譲歩することなく的確なコメントをしていただき本当に感謝しております。直接指導を受けている伊藤君などをたまにうらやましく思いジェラシーを感じることもさえありました。助手になられてからは雑多な作業が多いようで研究時間があまり取れないようですが、あまりイライラされずイツまでも若々しい原田さんでいて下さい。そして奥さんを大切にしてください。3年間ありがとうございました。

研究室秘書の高橋さん、石坂さんには僕が今年特に業者とのやり取りが多かったので、そのためにいろいろと面倒な手続きをしていただきありがとうございました。高橋さんはもしよろしければ今度泳ぎをレクチャーしますので、夏にプールでも行きましょう。それでは3年間お世話になりました。

博士課程1年の下坂さん、野口さんには研究における具体的・技術的なアドバイスをいただきました。大変感謝しております。

下坂さんには2号館では”イロイロ”な話をするのができ本当に楽しい研究生活が送れました。もちろん研究においては自分が苦手とする分野の話でも分かりやすい例を示した上で話をしてくれて、さまざまな新しい知識を得ることができました。今年から8号館に移られてしまい話す機会が減ってしまったのが本当に残念でした。3年間ありがとうございました。

野口さんには昨年のIPAなどJavaやH8に関するトリビアな質問まで丁寧に答えていただき、感謝しています。ありがとうございました。

修士2年の飯田さんには自分があまり接することのない世界について話を伺うことができ、とても新鮮でした。これからはいろいろな話を聞かせて下さい。3年間お世話になりました。

修士1年の大谷、久保寺、黒岩、高田、藤本、羽山にはいろいろな雑用をやらせてしまって申し訳ないと思っています。ご苦労さまでした。そしてありがとう。

黒岩とは昨年から同じ部屋の住人として共に生活をしてきましたが、その愛らしいキャラクターにはとても癒されました。来年から僕はそこにはもういません、安心して研究を進めて下さい。

藤本の常に「ウツ」という口癖にこっちがリアルに鬱になりそうでしたが、いろいろな人のモノマネは楽しませてもらいました。そのアグレッシブさを持って面白いおもちゃを作して下さい。モノマネはほどほどに。

学部4年の小西、桜井、未益、瀬川、田岡、長井、メハラブ、山西には雑多な用事などをお手伝いしてもらいました。どうもありがとう。

瀬川にはいつも電話の対応をしてもらって本当に感謝しています。そしてさりげない突っ込みに可愛らしさを感じました。彼女さんを大切にしてください。そして博士課程に行っても今の勢いを持続しよい研究をしてください。

メハラブは207にいる時間が少なく、イロイロな小言も言いましたが怪しい日本語の会話は楽しませてもらいました。ありがとう。修士に入ってからデスクライトをやるかどうかは分かりませんが、1度僕が書いたプログラムをちゃんと理解することをお勧めします。バグがないとも限らないしね。これからも(は?)頑張って研究をしてください。未益さんにはイロイロ手伝ってもらい感謝しています。もっとも僕が手伝った量の方が多いような気もしますが…。9月10月のストレスが溜まっているときは適切でないコメントもしてしまいましたが、許して下さい。それはともかく4月からは君も先輩となるわけです、後輩になめられないようにこれからもスキルアップを続けて下さい。そしてキチンと思ってることを(メールなどではなく人前で)発言できる技術を見につけられるようになると、君のポテンシャルがよりいっそう生かせると思うのでちょっと勇気を持って試してみてください。一年間本当にお世話になりました。ありがとう。

同期の伊藤君、岩村、大串君、源田君には同じ苦しみ(?)を共有する仲間として3(2)年間ともに楽しく充実した時間が過ごせました。どうもありがとう。

伊藤君には何度となく厳しい突っ込みをされたと思いますが、あまり知らない人の前でおとなしくなってしまう伊藤君を見て思わず笑ってしまったような記憶があります。これから社会に出るわけですが是非エラくなって自分が友達に自慢できるような人物になって下さい。間違っても犯罪で逮捕されたりして”有名”にならないでください。

岩村にはいつもNAZOな発言には爆笑させられました。これから岩村がコンサルタントで働くと思うとどれだけのクライアントを納得させられるか(だましとおせるか?)将来が楽しみです。

大串君は常にマニアックなキャラクターで話題の中心にいて、いつもうらやましいなと感じていた記憶があります。同じ研究室の同期としてアドバイスさせてもらおうとすれば”ネコ耳”の生えた女の子は地球にはいないと思うので、是非宇宙を目指して下さい。これからの活躍を期待しています。

源田君とは直接話しをする機会はあまりなかったですが、マニアックな日本語の討論会資料はいつも楽しませてもらいました。研究室旅行の幹事ご苦労さまでした。

最後に研究とは直接関係がないですが、僕の休日のストレス発散の場を提供してくれたインラインスケートおよび sk8er の皆様にも御礼を申し上げます。そしてこれからもよろしくをお願いします。



図 D.2: クリスマスラン '03 集合写真



図 D.3: Thanks My Skate Shoes !!

平成 16 年 2 月 福井 類

以上

修士論文

平成16年2月13日提出

26524 福井 類