

摘要

近年の建築では BIM (Building Information Modeling) と呼ばれるコンピュータ上に現実と同じ建物の立体モデルを再現し，可視化するワークフローが注目されている．従来の配管 BIM は高精度な Lidar センサを用いて配管モデルの推定を行なわれていたが，振動に弱く高価である．そのため，Lidar センサより安価である RGBD カメラを採用する．本研究は従来の点群データのみを用いた 3D 再構築を行わず，取得画像と関連する点群データに基づき配管の 6D 姿勢推定を行い 3D 再構築の高精度化を目的とする．また，姿勢推定の従来の方法では手作業で行われていたが，深層学習を取り入れることにより高精度かつ高速化を図る．

謝辞

本稿の内容は，著者が京都大学大学院工学研究科機械工学専攻メカトロニクス研究室（吉川研）での博士後期課程において，そして 2007 年度現在，講師として在籍している立命館大学理工学部ロボティクス学科において学んだ内容をまとめたものです．あまり明文化されない，しかし非常に重要なこのような知識を与えて頂いた，吉川研と立命館大学ロボティクス学科のすべての方々に，深く感謝の意を表します．

なお，本稿の表紙には，指導教員として川村貞夫教授の名前がありますが，これは修士論文，卒業論文のテンプレートとして出力されたものです．したがって，本稿の文責は川村教授ではなく，すべて著者（金岡）にあることをここに明記しておきます．

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	既存研究	2
1.3	研究目的	3
1.4	本手引の構成	4
第 2 章	深層学習による配管 6D 姿勢推定	5
2.1	配管 6D 姿勢推定方法	5
2.2	各章の書き方	5
第 3 章	論文の体裁	7
3.1	L ^A T _E X の使用	7
3.2	和文と英文の混用	7
3.2.1	英語の使用	7
3.2.2	句読点	7
3.2.3	括弧	7
3.3	段落	8
3.4	参考文献	8
3.5	記号	8
3.6	数式	8
3.7	図表	8
3.7.1	図表の記述例	10
第 4 章	その他の注意事項	11
4.1	論文のオリジナリティ	11
4.2	いつ論文を書き始めるか?	11
4.3	単位系	12
4.4	一覧性	12
4.5	分量	12
4.6	カラー	12
4.7	曖昧な表現	13
4.8	厳密な表現	13
4.9	情緒的な表現	13
第 5 章	結言	15
	参考文献	17

付録 A 数式の記述	19
A.1 記述例	19

目 次

1.1	Gen6D ネットワーク構造	3
1.2	YOLO モデルの検出の流れ	3
2.1	RGB-D カメラを用いた深層学習によるアイソメ図作成方法	5
3.1	平面二自由度マニピュレータのモデル	9
3.2	動的可操作性楕円体の軸長（特異値）の変化	10
3.3	動的可操作性楕円体計測実験システム	10

表 目 次

3.1	二自由度マニピュレータ軌道制御シミュレーションのパラメータ . . .	9
-----	-------------------------------------	---

第 1 章 序論

本章では、本研究の背景と目的、そして構成について述べる。

1.1 研究背景

配管は気体、液体、粉粒対などの流体を輸送や配線の保護などを目的とする管のことである。例を挙げると、電気配線やケーブルを保護する電気配管や生活に必要な水を家庭、学校などに輸送する水道管などに使用されている。この配管は運用と保護を確保するために、耐久性と安全性を常に保ち続ける必要がある。

BIM とは、Building Information Modeling の略称で、建築物や土木構造物などの情報をコンピュータ上に現実と同じ建物の立体モデルを形成し、設計から維持管理までのプロセスをデジタル化する新しいワークフローの一環である。この BIM モデリングはこれまでの 3 D モデリングとは大きく異なる。3 次元モデルは 2 次元上で図面を作ってから 3 次元の形状を組み立てシミュレーションするという流れが主流であった。そのため、3 D モデルに修正点があった場合に、2 D の図面を全て修正してから構築する必要があり効率的ではなかった。しかし、この BIM モデルは一つのデータを修正すると全てのデータが連動し、関係する図面の該当箇所が自動修正されるようになるため、従来の 3 次元モデルよりも高校率で作業を行うことができる。

本研究においては建築物の中でも配管に焦点をあて、配管のアイソメ図を作成することが最終目標である。アイソメ図を取得するためにはこれまでに Light Detection and Ranging(LIDAR) センサーと呼ばれるレーザー光を使用して離れた場所にある物体の形状や距離を測定できるセンサーを使用していた。このセンサーは精度が非常に良いというメリットはあるが、他のセンサーと比較すると高価であるというデメリットを抱えている。そのため、一般的に使用するためには安価なセンサーでデータ収集ができることが望まれる。また、従来の方法ではセンサーから取得されたデータを手作業で配管を選択することでアイソメ図を作成していた。手作業による手法は効率が悪いことから、自動で配管を認識できるシステムが求められる。このような背景から本研究では LIDAR センサーの代わりに RGB-D カメラを用いた深層学習によるアイソメ図の作成を目指す。RGB-D カメラは Depth 画像を使用できることから LIDAR センサー同様に距離情報を取得でき、配管の距離を算出することが可能である。また、LIDAR センサーと比較すると約 40 倍ほど安価であるため、たくさんの方が利用しやすいメリットがある。また、深層学習を取り入れることで自動で配管の認識を行い高効率化を目指す。

1.2 既存研究

アイソメ図を作成するにあたって曲管と T 字管の 6 D 姿勢を認識する必要がある。6 D 姿勢は座標 X、Y、Z に加え Yaw、Pitch、Roll の回転情報を加えたものである。その 6 D 姿勢推定を行うネットワークである Generalizable Model-Free 6-DoF Object Pose Estimation from RGB Images(Gen6D) を紹介する。姿勢推定に必要な主なデータセットは 3 次元データやカラー画像、深度データなどが代表的である。しかし、3 次元データを生成するためにはオブジェクトの 3D モデルを作る必要があるため、実用化するのは困難である。Gen6D ネットワークはデータセットを 3 D データを必要とせずカラー画像のみで物体の姿勢推定を行うことができる。Gen6D のネットワーク構成について図 3 に示す。まず、Detector と呼ばれる工程では参照画像の情報をもとに認識したいオブジェクトの領域を検出する。これは CNN と呼ばれる畳み込みニューラルネットワークを用いて画像の特徴を抽出し、得られた特徴をもとに領域を予測する。次の工程である、Selector では Detector で得られた領域の画像と最も近い視点を持つ参照画像を複数枚ある中から 1 つ抽出する。これは選択された参照画像の視点をテスト画像の視点とほぼ同様とみなし、誤差は生じますがオブジェクトのポーズの初期姿勢を形成する。最後の工程では先程得られた姿勢の改良を試みる。まず、参照画像から近い視点の画像をさらに 6 枚選択し、全参照画像間の平均と分散を算出し、初期に求められた姿勢の情報を改善して最終的な結果を予測する。この研究のメリットとして RGB 画像のみを用意することで物体の姿勢を推定できるため、データセットの作成は非常に容易である。しかし、この Gen 6 D をしようするにあたって問題点が 2 つある。まず、一つ目に RGB 画像は距離情報を持たないため、スケール情報を示さなければならないアイソメ図を作成することが不可能である。そのため、Depth 画像を用いることでカラー画像に加え、震度情報が追加されるため物体間のスケールを算出することが可能である。2 つ目は複数の物体を姿勢推定することができない点である。一般的に配管が設置されている現場では、単体ではなく複数の配管が張り巡らされていることがほとんどであるため、画像内の全ての配管を網羅し認識することが要求される。これを解決するためには Gen 6 D の Detector を複数物体検出可能なネットワークに変更する必要がある。

その Detector を複数物体検出可能にするにあたって、2 次元上で複数の物体検出を可能にする YOLOV3 を紹介する。このモデルはほぼ同時期に発表された Fast R-CNN と同様に、物体検出に大きな影響を与えた。これ以降、End-to-End モデルとリアルタイム検出が物体検出の中で主流となった。YOLO の特徴は従来までは境界設定と物体検出を 2 段階に行っていた作業を一度に行うことで推定速度の高速化を行うことができた。図 1.2 に YOLO の物体検出までの流れを示す。

まず、入力画像を $S \times S$ のグリッドセルに分割する。物体の中心がグリッドセルに存在していた場合に、そのセルが物体を検出するように学習する。次に、バウンディングボックスの推定では各グリッドセルに B 個のバウンディングボックスを持ち、それらのボックスの信頼スコアを予測する。信頼スコアとは背景ではなく物体が含まれている確率のことである。次に、各グリッドセルは複数のクラスに対する条件付き確率を予測する算出された条件付きクラス確率と一つ前の個々のバウンディングボックスの信頼スコアを掛け合わせることで、バウンディングボックス毎のクラ

スに対する信頼スコアを得ることができる。このスコアを使用しどのバウンディングボックスが正解の物体を推定しているのかを判断する。

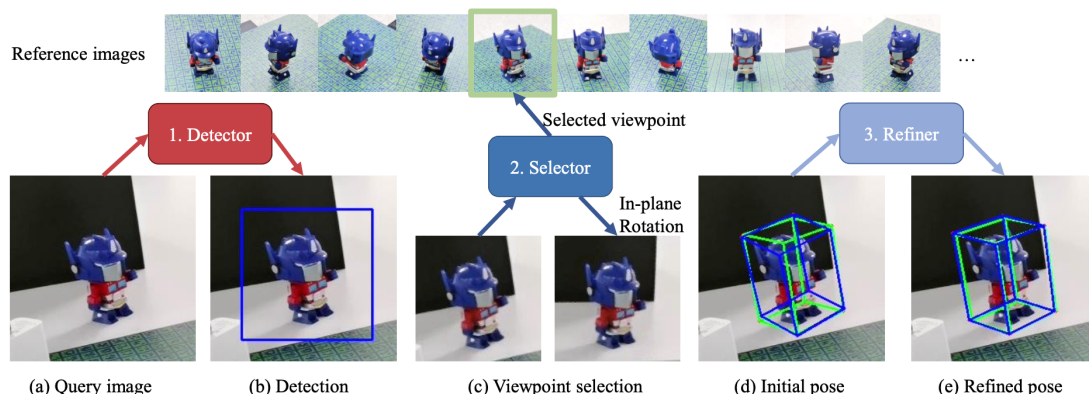


図 1.1: Gen6D ネットワーク構造

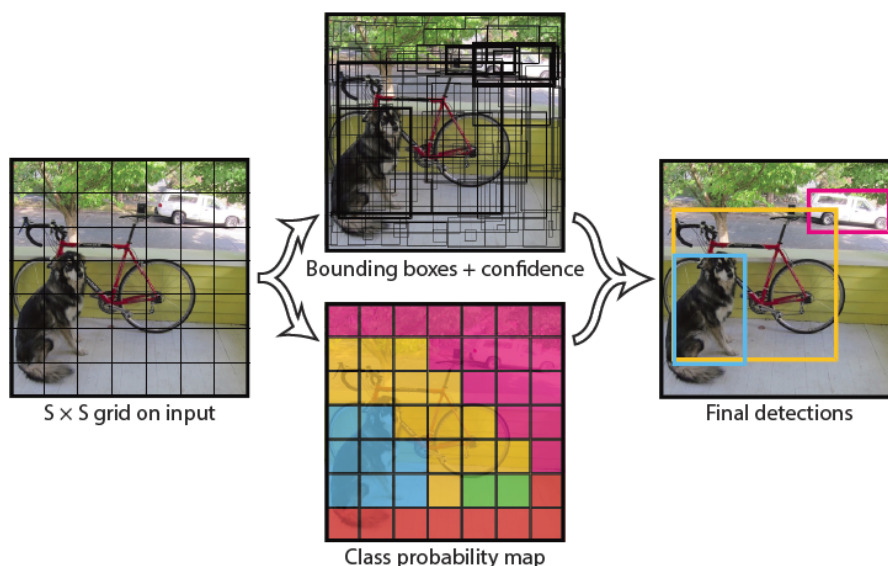


図 1.2: YOLO モデルの検出の流れ

1.3 研究目的

本研究ではRGBD データを使用した深層学習による配管 6D 姿勢推定を行い、RGBD カメラを用いることによる安価な機器での姿勢推定の実現を試みる。また、既存の RGB 画像のネットワークに Depth 画像を組み込んだモデルを提案し、認識精度向上と推定速度の高速化を目標とする。本研究の貢献は以下になる。まず一つ目は深層学習による RGB 画像と Depth 画像より物体検出ネットワークの提案である。特に、RGB 画像と Depth 画像からそれぞれ抽出された特徴を結合する RxDLayer を導入し、ネットワーク性能の向上させた。他のネットワークと精度を比較することで提案ネットワークの有効性を検証した。

2 つ目は既存の 6 D 姿勢推定ネットワークに複数物体検出を可能にさせたことである。配管は単体ではなく複数の管が張り巡らされているため、複数の認識を可能にする必要がある。提案ネットワークでは画像内部にある配管全てを網羅し、それぞれの物体の中心ピクセル座標とスケールを推定することができる。3 つ目は本研究の最終目的であるアイソメ図を作成するにあたっての必要不可欠な配管距離測定である。アイソメ図は配管の向きだけでなく、距離情報を図面に示す必要がある。そのため、Depth 画像を用いることでネットワークによって認識された情報をもとに、配管の距離情報を算出することを可能にした。

1.4 本手引の構成

本論文の構成は以下のようになる。第一章では研究背景、既存研究、研究目的について述べる。研究背景では、Building Information Modeling (BIM) についてや RGB-D カメラを使用するメリットについて述べる。既存研究では、配管 6 D 姿勢推定と物体検出のそれぞれのネットワークを紹介する。それぞれのネットワークのメリットやデメリットをもとにアイソメ図に必要となるネットワーク設計を述べる。研究目的では、本研究の目的及び貢献について述べる。第 2 章では、論文の論理構成をどのようにすべきかを述べる。第 3 章では、論文の体裁について述べる。第 4 章では、論文作成および研究一般におけるその他の重要な注意点について述べる。第 5 章は結言である。

第 2 章 深層学習による配管 6D 姿勢推定

従来のアイソメ図取得には LIDAR センサーにより 3 次元点群を取得し図面を作成していたが、センサーが高価であるというデメリットを抱えていた。そのため、本研究では LIDAR センサーよりも比較的安価な RGB-D カメラを用いてデータセット収集から深層学習やアイソメ図作成までの流れを紹介する。第 2.1 節では RGB-D カメラを用いた深層学習による配管 6D 姿勢推定の手順を述べる。第 2.2 節では物体認識のネットワーク設計を詳しく説明する。

2.1 配管 6D 姿勢推定方法

RGB-D カメラを用いた深層学習による配管のアイソメ図作成の手順はデータ収集、物体認識、姿勢推定、アイソメ図作成の 4 つに分けられる。図 2.1 にそのプロセスの流れを示す。

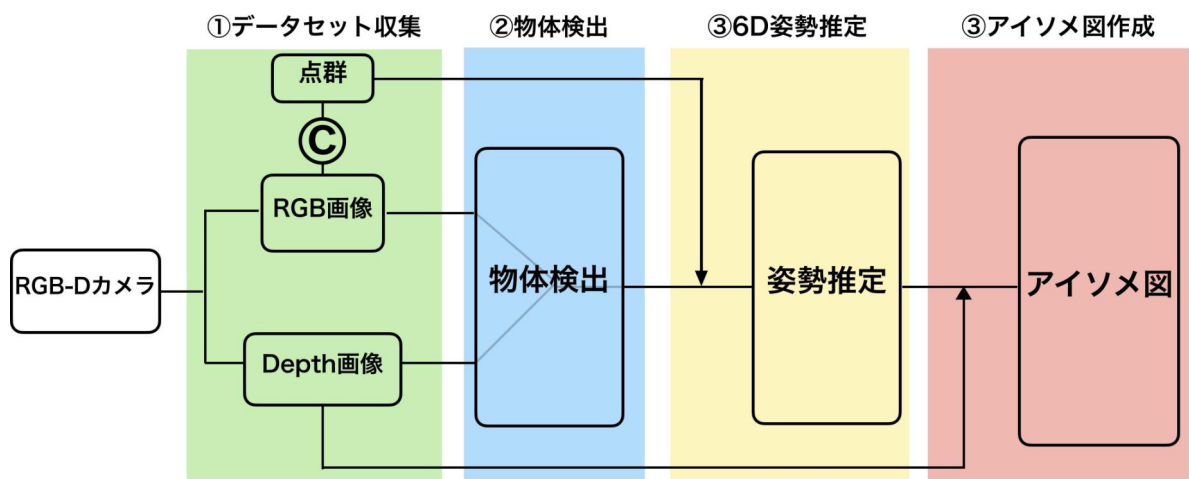


図 2.1: RGB-D カメラを用いた深層学習によるアイソメ図作成方法

2.2 各章の書き方

各章（節，および項）においては，その最初の段落で，その章または節でなにをしようとしているのかを手短に記述すること。

本文は適当な長さの段落に分け、段落の最初の一文でその段落の趣旨を明らかにしておく。その趣旨をまとめると、その章（節）全体の論理的な筋書きがわかるようになっていることが望ましい。

また、各章の終わりにも「考察」または「まとめ」の節を置き、その章での成果をまとめておく。最初の段落で「しようとしていること」を述べよ、としたが、それに対する「出来たのか、出来なかったのか」という答えを、その章の理論的考察、シミュレーション、実験結果から論理的に導きだして述べておくこと。

第 3 章 論文の体裁

前章では，研究内容を論文化する際にどのような論理構造に当てはめていけばよいかを述べた．本章では，文章の体裁の標準化について考察する．

3.1 L^AT_EX の使用

原則として L^AT_EX を使用すること．本手引を L^AT_EX のテンプレートとして使えば，かなり整った論文になるはずである．ワード等のワープロソフトを使用するのは，目次，章番号，式番号，図表番号，参考文献等の参照などの変更の手間，数式の美しさ，機種やバージョンに依存する互換性，などに問題があることから推奨しない．

3.2 和文と英文の混用

論文中では，和文と英文が共に使用されるため，読みやすい文にするには注意が必要である．

3.2.1 英語の使用

本文中に英語（カタカナ語）がいきなり出てきていないかチェックすること．日本語で論文を書く場合，日本語で書けるものは日本語で書くのが原則である．慣用的に英語での表現が主流のもの，英語でしか表現できないもののみを英語で記述する．

3.2.2 句読点

和文の句読点は，全角の “，” と “．” を使用し “、” と “。” は使用しないこと．同様に，欧文中では欧文半角の “,” と “.” を使うこと．

3.2.3 括弧

和文中では全角の括弧（ ）を使用する．欧文中では半角の括弧 () を使用する．

3.3 段落

各段落の最初は全角 1 字分（2 字分ではない）だけ空白を入れる．段落の終わり以外では改行しないこと．

段落最初の空白は，このテンプレートを使えば自動的に挿入される．

3.4 参考文献

「参考文献」は特に日本語と英語が混じり合うので，句読点，スペースなどに注意すること．記述は，本稿のフォーマットに従うように．すなわち，和文成書の場合 [1]，和文論文の場合 [2]，英文成書の場合 [3]，英文論文の場合 [4]，となる．これは，日本ロボット学会誌の参考文献のフォーマットを多少改変したものである．

英文著者名のイニシャル内には，省略のピリオドがあってもスペースは不要であるが，イニシャルとファミリーネームの間には，半角スペースが必要である．例えば M.W.Spong and O.Khatib: “...” のようになる．

文献タイトルのあとのコンマの位置は和文の場合 “...”，となるが，欧文の場合は “...,” のように中に記述する．

3.5 記号

使用する記号のすべてについて，最初に出てきた時に，その定義ないし説明が与えられているかどうかをチェックすること．また同じ記号が異なる意味で使われていないことを確認すること．

3.6 数式

線形代数には不可欠な，スカラー，ベクトル，行列の区別を明確にすること．スカラーを表わす変数なら x のように通常の Roman のイタリック体，ベクトルなら x のように Bold の小文字，行列なら X のように Bold の大文字で表現するのが慣例である．

また， \sin などのあらかじめ定められた関数は \sin としないこと．例えば $\sin hx$ などとしてしまうと，三角関数 $\sin hx$ なのか双曲線関数 $\sinh x$ なのか判別不能である．文章についてもそうであるが，数式はなおさら一意に解釈できるように気を配ること．これは \cos , \tan , atan , diag , rank などと同様である．

数式の記述例を付録に示すので参照のこと．

3.7 図表

図や表は本文中で必ず引用されており，その図や表の説明や見方が本文中で記述されていること．またその図や表から得られる結論（結果）が記述されており，図や表が複雑な場合には，そのどの部分に注目すればそのような結論が得られるかが

表 3.1: 二自由度マニピュレータ軌道制御シミュレーションのパラメータ

リンク & joint i	リンク長 l_i [m]	リンク 重心位置 l_{gi} [m]	リンク 質量 m_i [kg]	リンク 慣性モーメント I_i [kg·m ²]	関節 ダンパ係数 d_i [N·m·s/rad]
1	0.5000	0.2500	3.000	0.2458	0.1000
2	0.5000	0.3125	4.000	0.2927	0.1000

記述されていること．定義のなされていない記号が図や表中にないかどうかチェックすること．

グラフについては，曲線の区別が必要な場合は区別のつきやすい線種（実線と破線など．点線は時々区別しがたいことがある）を使用すること．また縦軸と横軸の説明と単位が記入されていることをチェックすること．単位は特に重要であるので必ず書く．単位が無い場合も $[-]$ として無次元数であることを明示する．

グラフを書く際には，グラフ描画ソフトウェアのデフォルト設定を何も考えずに踏襲することは厳禁である．グラフで伝えたい内容の意味を考え，必要十分な記述を心掛けよ．具体的注意点は，文献 [5] の第 4 章「図の作成法と作図力学」に詳しい．

最近目につくのは，エクセルのデフォルト設定の「グレーでの背景塗りつぶし」と「横線のみの実線のグリッド線」を変更せずにグラフを書く例である．コントラストを考えればグレーで背景を塗りつぶす意味はなく，白背景にすべきである．また，縦軸と横軸の両方が離散的でなく連続的な数値を取りうるデータを扱うグラフの場合には，グリッド線は縦横格子状に書くべき（後述の 図 3.2 参照）である．また，グリッド線は補助線であるので，原則として点線にすべきである．

キャプションは，図・グラフの場合は下部に，表の場合は上部に置く．また，図表内のテキスト，およびキャプションは英語で記述する例が多いが，日本語で書く修論・卒論では，日本語で書いてもよいであろう．キャプションには，その図表の内容を端的に表わすタイトルを書くこと．単なる「実験システム」とするのではなく，例えば，後述の 図 3.3 のキャプションのように，何を実験するシステムなのかを記述すること．

グラフのキャプションで注意すべきは，意味のない記述である．例えば，横軸を電圧，縦軸を電流として描画したグラフのキャプションを「電圧と電流の関係」としてしまうことである．これはグラフを見れば分かる情報を単に書き直しただけであり，あまりにも陳腐である．

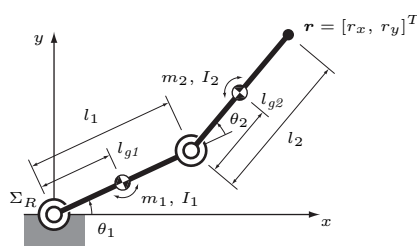


図 3.1: 平面二自由度マニピュレータのモデル

3.7.1 図表の記述例

表, 図 (イラスト), 図 (グラフ) の例をそれぞれ, 表 3.1, 図 3.1, 図 3.2 に示す.

図表を \LaTeX のコード上でいかに表現するかは各個人によって様々な技術があり, どれを使えば良いかは各自が判断すること. 著者は, 基本的に例示したような方法で表現している. 特徴は, テキストを図のファイル中に書くのではなく, `picture` 環境を使ってソースコードの中で記述していることである. これによって,

- 本文と図の数式の体裁の完全な一致
- ソースコードでのスペルチェック

が可能になる. しかし, 非常に手間がかかるのであまりお勧めできる方法ではない. 一般的な方法でもないので必ずしも真似をする必要はないことに注意されたい.

最後に, シンプルなコードの例として, 写真を 図 3.3 に示す.

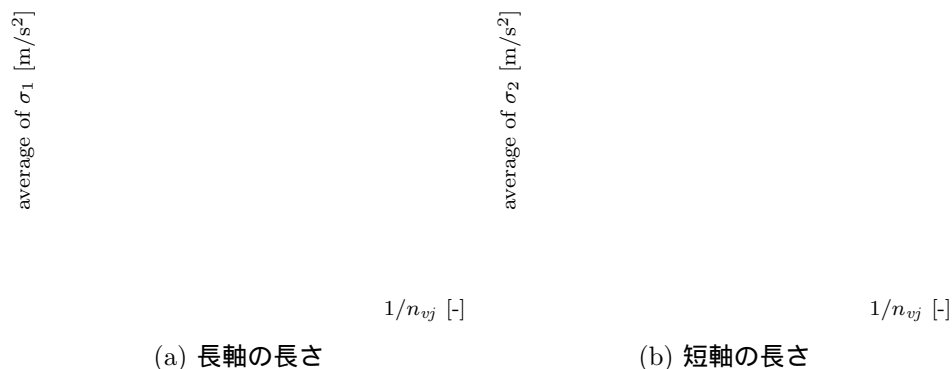


図 3.2: 動的可操作性楕円体の軸長 (特異値) の変化

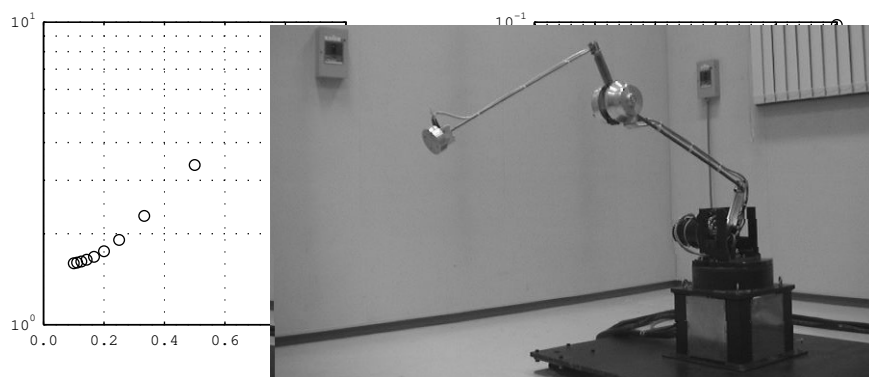


図 3.3: 動的可操作性楕円体計測実験システム

第4章 その他の注意事項

本章では，論理構造，体裁以外で，論文作成の際に重要だと思われる注意点について列挙しておく．

4.1 論文のオリジナリティ

学術論文においてはオリジナリティが重視されるため，「自分の仕事」と「他人の仕事」を明確に分けておくことが不可欠である．自分がある大きなテーマの一部を担当しているなら，その大きなテーマの中での自らの寄与を明確にしなければならない．他人のアイデアや仕事を，さも自分にオリジナリティがあるように書いてはならない．直接指導を受けている教員のアイデアであっても「(だれそれ)によって提案された(なになに)～」と明示すること．

論文は，オリジナルな結果を発表するものであり，スタッフや先輩に言われるがままに実験してその結果を報告する，という内容であれば，たとえ実験の趣旨を十分理解してデータをとったとしても，データを取った人の論文として発表すべきものではない．データ取得にどれほど苦労してもオリジナリティがなければ，謝辞で「実験・調査・観察を手伝ってくれた人」として載せるのが妥当である．「自らのオリジナリティが評価される」ということを常に意識し，自らの頭を使って考えること．

「先生(先輩)の研究を手伝っている」という意識で卒論・修論を書いている学生が散見されるが，これは大きな間違いである．修士はもちろん，学士であっても，自ら論文を書く能力を育むことが求められている．学生諸君が論文作成に主体的かつ積極的に取り組むことが必須である．先生や先輩の方がむしろ，指導を通してその手伝いをしているのである．

4.2 いつ論文を書き始めるか？

研究成果がすべて出てからでは効率が悪い．ある程度方針が固まったら，論文を書き始めるべきである．結果が出ていなくとも，タイトル，目次，緒言(期待する)結言は書くことができる．論理構成をまとめることで研究の流れが整理され，それ自体が研究を進めていく上での指針となる．したがって，研究室に配属され，研究テーマが決定したら，早速本手引を参考にして論文を書き始めるべきである．

4.3 単位系

原則として国際単位系すなわち SI 単位系を用いること．例えば，[sec] という記述は古い．[s] とすること．ただし，グラフの軸等の単位で直感的な分かりやすさを重視して SI 単位でないものを使用することは構わない．例えば，目標軌道を [deg] で設定したならば，その軌道制御実験結果のグラフは [rad] ではなく [deg] で書いた方がよい．また，単位は通常の Roman で記述し，[deg] のようにイタリックとしない．数式としての表現が必要な単位であっても，[m/s²] ではなく [m/s²] として，変数と区別すること．

4.4 一覧性

論文には，一覧性が求められる．例えば，比較すべき二つのグラフがある場合，それらが二ページに渡っていては不便である．多少グラフが小さくなっても，一覧できるように載せること．

4.5 分量

同じ研究成果を表現するための文章量は少ない方がよい！「少ないとさみしい」という（？）勘違いな理由でデータを羅列し，論文の分量を膨らますのはもってのほかである．記述は常に必要十分を心掛け，無駄な表現，言い回し，データがないかどうかチェックすること．また，必要な情報をすべて記述しているかをチェックすること．基準は，その論文を読んだ人が，論文で主張されている理論，シミュレーション，実験を再現して同じ結果を出せるか，という視点で見るとよい．再現性のない（再現できない）ものは信用されないと考えること．

4.6 カラー

原則として，論文ではカラーは使わない．これは，あらゆる印刷での可読性を維持するために重要である．自分がカラーで見ることができるからと言って，他の人もカラーで見ることができるとは思わないこと．

グラフでは，安易にカラーを使いがちであるが，その前に白黒で表現できないか考えること．たとえカラーを使わざるを得ないと判断したとしても，白黒で印刷した場合の可読性を最大限確保するように心掛けること．

写真等は，カラーでも白黒印刷して分らなくなる訳ではないので，カラーにしておく方がよい．その場合も，白黒印刷を意識した撮影を心掛けるべきである．

ただし，最近はカラーでの印刷環境も普及しつつあり，また PDF ファイルでの閲覧も可能であるため，修論・卒論の場合にはカラーの使用もあり得る．

4.7 曖昧な表現

立命館の学生の文章に非常に多く見られる表現が「～といえる」「～とわかる」である。これらはほとんどの場合、意味を曖昧にする効果しか持たず、削除しても全く問題ない。理系の文章においては、断定すべきところは断定し、不確実なところはどうか不確実か明示するべきであり、このような曖昧な語尾の言い回しはしないこと。

4.8 厳密な表現

前節とは逆に、不用意に厳密な表現も多々見られる。その最たるものが「最適な～」「～を検証する」である。

何らかの条件が「最適である」ことを示すためには、

1. 最適性を数値的に表現できる評価関数を定義する
2. その条件下において評価関数が最大（最小）であることを証明する

というプロセスが不可欠である。このプロセスを経ていない条件に対して「最適な～」という言葉を使ってはならない。

また、何らかの仮説が事実であることを「検証した」と主張するためには、

1. 仮説の妥当性を理論的に証明する
2. 上記の証明が正しいことを示すため、および、実装上の問題が生じないことを示すため、シミュレーションもしくは実験、できればその両方で仮説の妥当性を確認する。

ことが必要である。シミュレーションや実験をただだけでは「検証した」と主張してはならない。

4.9 情緒的な表現

理系の文章においては、客観的な記述がすべてであり、主観的感情を含む情緒的表現は一切省く必要がある。例えば、「非常に高精度な（単に高精度と書けばよい。程度を示したいなら定量的に精度を示す）」、「～してしまった（～した、でよい）」、「この実験は非常に難しかった（感想など不要）」など、自分の曖昧な主観を基準とした情緒的表現がないか、今一度確認すべきである。

第 5 章 結言

本稿では，立命館大学 理工学部 ロボティクス学科 川村・金岡研の修士論文，卒業論文執筆の共通化と効率化のために，論文の論理構造，体裁，その他一般の注意点を明文化した．

途中，読み苦しい部分もあったと思われるが，より体系的で読みやすい手引きとなるよう，改訂を重ねて行く予定である．

参考文献

- [1] 著者：書名．出版社，year.
- [2] 著者：“題名”，掲載誌名，vol. W, no. X, pp. YYY–ZZZ, year.
- [3] Author(s): Book Title. *Publisher*, City of Publisher, year.
- [4] Author(s): “Paper Title,” *Name of Journal*, vol. W, no. X, pp. YYY–ZZZ, year.
- [5] 中島 利勝，塚本 真也：知的な科学・技術文章の書き方．コロナ社，1996.
- [6] 中島 利勝，塚本 真也： \LaTeX ユーザのためのレポート・論文作成入門．共立出版，2002.
- [7] 川村 貞夫：効果的な表現戦略．森北出版，1998.
- [8] 酒井 聡樹：これから論文を書く若者のために．共立出版，pp. 138–140, 2002.
- [9] 有本 卓：ロボットの力学と制御．システム制御情報学会編，朝倉書店，1990.

付録 A 数式の記述

本付録では、数式の記述例を示す。本手引のクラスファイル `kzthesis.cls` 独自のコマンドの使用法の説明も兼ねているので、参考にする。

A.1 記述例

まず、受動性の定義を与えておく [9]。システムの入力 u と出力 y が同じ次元であるとする。このとき、ある有限な正の定数 γ_0^2 に対して次式が成り立つならば、システムは受動的であるという。

$$\int_0^t y^T(\tau)u(\tau)d\tau \geq -\gamma_0^2, \quad \forall t > 0 \quad (\text{A.1})$$

一方、 n 自由度ロボットの動力学は一般に次のような微分方程式に従う。

$$u = M(q)\ddot{q} + \frac{1}{2}\dot{M}(q)\dot{q} + S(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + d(\dot{q}) \quad (\text{A.2})$$

ただし、 $q \in \mathbb{R}^n$ は関節変位ベクトル、 $u \in \mathbb{R}^n$ は関節駆動力ベクトルである。右辺第一項は慣性項であり、 $M(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ は実対称正定な慣性行列である。第二、三項は非線形項であり、 $S(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ は歪対称行列となる。 $g(q) \in \mathbb{R}^n$ はポテンシャル項である。 $d(\dot{q}) \in \mathbb{R}^n$ は摩擦等による散逸項であり、その各成分は \dot{q} の対応する成分と常に同符号である。 $K(q, \dot{q})$ 、 $P(q)$ をそれぞれ運動エネルギー、ポテンシャルエネルギーとすると、以下のような関係が成り立つ。

$$K(q, \dot{q}) = (1/2) \dot{q}^T M(q) \dot{q} \quad (\text{A.3})$$

$$g(q) = (\partial P(q) / \partial q^T)^T \quad (\text{A.4})$$

このとき、ロボットの全内部エネルギーは $E(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) + P(q)$ となる。

ロボットシステムは、速度出力 $y = \dot{q}$ に関して受動的であることが知られている。すなわち、式 (A.2) から、

$$\begin{aligned} \int_0^t \dot{q}^T u d\tau &= \int_0^t \dot{q}^T \left\{ M\ddot{q} + \frac{1}{2}\dot{M}\dot{q} + S(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + d(\dot{q}) \right\} d\tau \\ &= \int_0^t \frac{d}{d\tau} \{ K(q, \dot{q}) + P(q) \} d\tau + \int_0^t \dot{q}^T d(\dot{q}) d\tau \\ &= E(q(t), \dot{q}(t)) - E(q(0), \dot{q}(0)) + \int_0^t \dot{q}^T d(\dot{q}) d\tau \\ &\geq -E(q(0), \dot{q}(0)) = -\gamma_0^2 \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

となり、式 (A.1) が成立する。ただし、 S の歪対称性と $\dot{q}^T d(\dot{q}) \geq 0$ を用いた。上式から、 γ_0^2 はロボットの初期内部エネルギーと解釈できる。