

岐阜県生産情報技術研究所研究報告

第6号 平成16年度

岐阜県生産情報技術研究所

Gifu Prefectural Research Institute of Manufacturing Information Technology

目 次

1. PC用CADデータCOSMOS表示方法に関する考察 - 実感できる「オンライン・コラボレート立体3D/CAD設計システム」の開発 -	1
2. 住宅設計における実寸大立体視の有効性評価 - 実感できる「オンライン・コラボレート立体3D/CAD設計システム」の開発	5
3. コンピュータグラフィックスにおける布の質感表現の改善 - 実感できる「オンライン・コラボレート立体3D/CAD設計システム」の開発	7
4. 誰にでも使える作業指向型ユーザーインターフェースに関する研究 - 実感できる「オンライン・コラボレート立体3D/CAD設計システム」の開発	9
5. RFIDタグを用いた位置センシング手法の検討 - 実環境重畳型ユビキタス情報提示システムの提案	11
6. 写真とCGの自然な合成ツールの開発 - 環境重畳型ユビキタス情報提示システムの提案	15
7. 段ボール製品の強度解析技術に関する研究 - IT/MT分野におけるシミュレーション技術の適用に関する研究	17
8. ヒューマノイドロボット「ながら-3」の開発 - 万博出展ロボット「ながら-3」の開発	19
9. 「ながら-3」の歩行パターン生成に関する検討 - 万博出展ロボット「ながら-3」の開発	23
10. 移動物体の位置検出手法の検討 - 万博出展ロボット「ながら-3」の開発	27
11. 人の動作模倣手法の検討 人とのインタラクションに基づくロボットの親和性向上に関する研究 - 万博出展ロボット「ながら-3」の開発	29
12. 情報収集(被災者探索)ロボットの移動機構に関する研究(第3報) - 被災者探索(情報収集)ロボットの移動システムに関する研究 -	35
13. 情報収集(被災者探索)ロボットの移動機構のハードウェアの改良 - 被災者探索(情報収集)ロボットの移動システムに関する研究 -	41
14. ロボット関節用静電クラッチの開発 - 高齢者を支援するシステム(機器)に関する研究	45
15. 案内ロボットの開発	51

PC用CADデータのCOSMOS表示方法に関する考察

藤井 勝敏 大野 尚則

Considering PC-CAD Data Viewer for COSMOS

Katsutoshi FUJII Naonori OHNO

あらまし 製造業の設計部門に広く普及しているPC用3次元CADで作成した形状データを，没入型6面立体視システムCOSMOSにて表示するための方法について考察する．COSMOSをCADのリモートディスプレイとして利用し，COSMOSにCAD画面の映像を描画させる方法と，異なるCADシステム間でのデータ交換を目的とした中間形式を利用してCOSMOSに表示する方法，そしてCADの保存データを直接参照してCOSMOSに表示する方法の3通りについて，利点と欠点および実用性について報告する．

キーワード CADデータ，COSMOS，OpenGL，中間形式

1．はじめに

岐阜県では1998年に没入型6面立体視システムCOSMOS(図1)を設置し仮想現実感(VR)の研究・開発を行ってきたと同時に，この装置を民間企業に開放し，特に製造業におけるVR技術の普及，利用促進に向けて取り組んできた．この装置は，自社内あるいは取引先の3次元CAD等で作成した3次元データの原寸大立体視表示し評価を行い，その結果を持ち帰って設計の修正・変更を行う一連の設計検討に現在最も多く用いられている．

本研究所ではこのようにCOSMOSを利用する企業に対して，持ち込まれるCADデータをできるだけ正確かつ簡単に表示するために，3次元モデルビュー(図2)の開発^[1]や，CADデータ変換ソフトを導入しモデルビューに対応するための変換作業を行ってきた．しかし，ここ数年でCADの製品種類およびバージョンの種類が増えており，企業が要求する高い変換精度や対応時間の迅速化が困難になってきた．したがって，より効率的なCADデータのCOSMOS表示手法が望まれている．



図1 COSMOS

そこで本報告では，PC用CADデータをCOSMOSで表示する様々な方法について，その長所と限界を整理し，今後の研究課題と開発の方向性について考察する．

2．CADデータをCOSMOSで表示する仕組み

CADは，PC等のコンピュータを使って製品形状等を設計するソフトウェアツールである．特に形状を平面投影した線図だけではなく，3次元的な形状情報を定義して任意の方向から見る事ができるCADを3次元CADと呼ぶ．COSMOSは，この3次元的な形状情報を，特殊な投影変換によって映像化することによって原寸大の立体視ができるようにするシステムである．

従ってCADデータをCOSMOSで表示する仕組みを検討する場合には，CADで定義した3次元の形状情報をCOSMOSに伝送する手段について考察する必要がある．本章では図3～5に示す，現在主に利用している3つの手段について解説する．

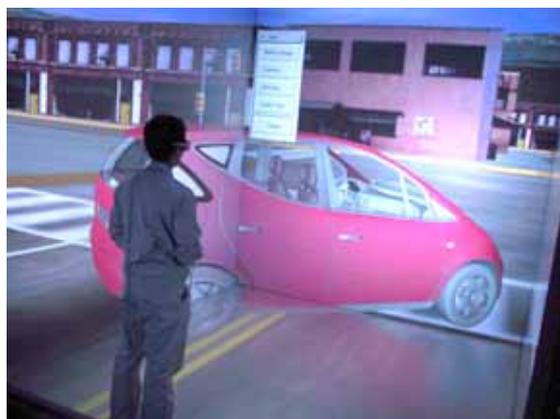


図2 モデルビュー

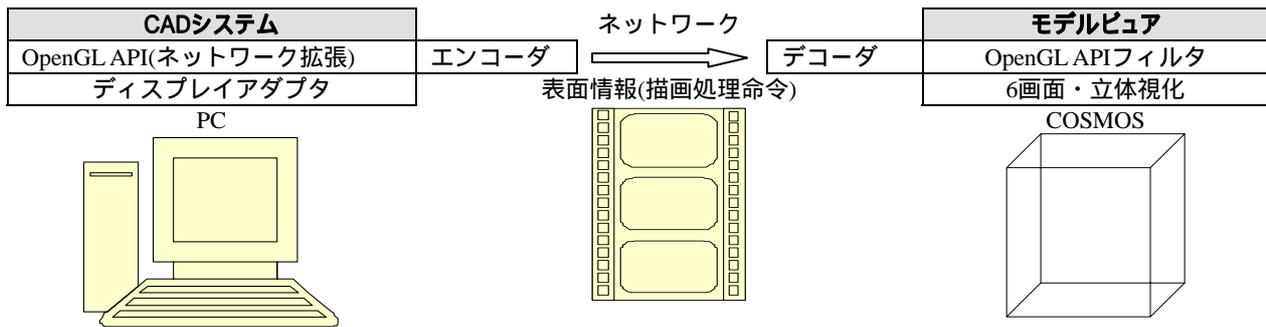


図3 COSMOSのリモートディスプレイ化

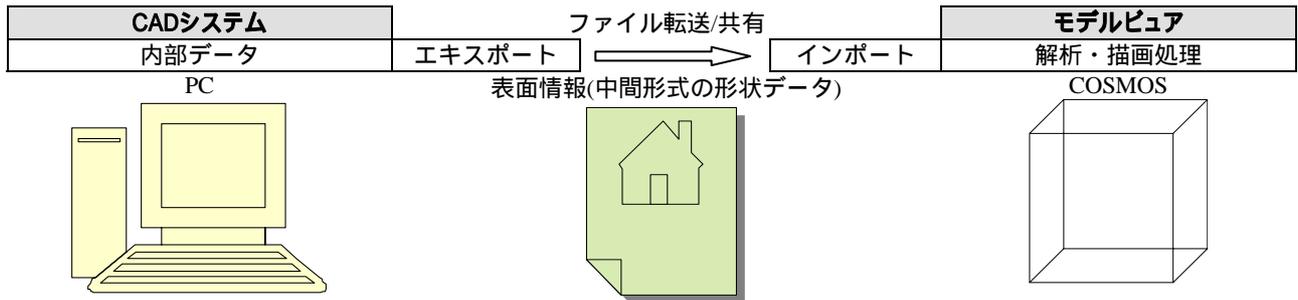


図4 データ交換用形式による伝送処理手順

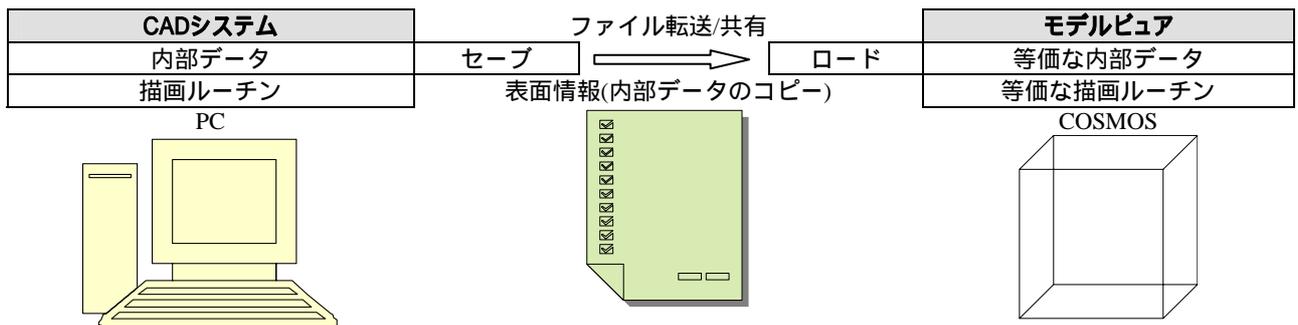


図5 データ保存用形式による伝送

2.1 COSMOSのリモートディスプレイ化

図3に示すように現在利用されている多くのCADシステムでは3次元の表面形状を描画する際にOpenGLが利用されている。OpenGLは元々SGI社のGWS用グラフィックスライブラリIRIS GLを、より多くのコンピュータ環境(他社のWSやPC、および多種類存在するグラフィックスカード)でも共通に利用できるように一般化するとともに、ネットワークで接続している他の(遠隔地の)コンピュータの画面にも3次元グラフィックスの描画を可能にするリモートディスプレイ技術を採用するAPIである^[2]。

COSMOSでの3次元描画にもOpenGLを利用しているため、CADシステムからCOSMOSをリモートディスプレイとして利用すれば、立体視に必要な3次元の表面形状情報を伝送できる。但し、現在最も普及しているMicrosoft Windows用のOpenGL API(opengl32.dll)は標準ではリモートディスプレイの機能が省略されているため、ネットワーク転送機能を付加したAPIに差し替えて利用する。また、COSMOS側では受け取った表面情報を6画面に振り分け、ユーザの位置から立体視できるようにするための

適切なフィルタリング(表1)を行ってから描画する。

この方法を使えば、CADの画面に表示されている製品の描画形状をCOSMOSの中でも、OpenGLで保証されたハードウェア非依存性の範囲内で、同じ形状、質感で再現することができる。また、CADで修正を加えれば、即座にCOSMOS内の描画形状を更新することができる。

表1 主なOpenGL APIのフィルタリング

OpenGL API	フィルタ処理
glTranslate, glRotate, glScale, glMultMatrix等	GL_PROJECTIONに対しては廃棄。GL_MODELVIEWではスタックが規定のレベル以下の場合には廃棄。
glViewport, glOrtho, glFrustum	廃棄
glLoadIdentity	GL_MODELVIEWに対しては、単位行列の代わりにCOSMOSライブラリが管理するワールド座標原点への移動変換行列をロード。
glBindTexture, glNewList, glCallList	番号を、ローカル側で未使用な名前に割り当て直して適用。

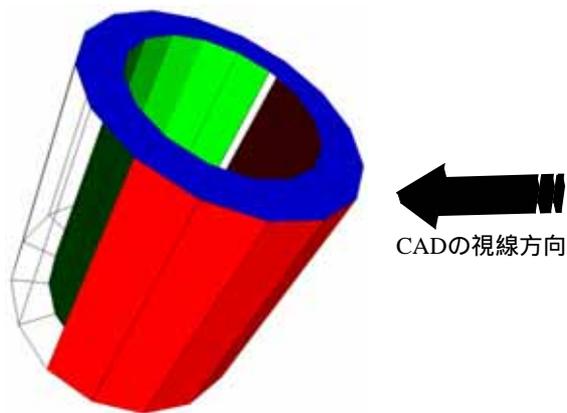


図6 裏側の描画省略（線：省略部分）

但し、この方法ではCADがOpenGL APIを使用して描画した3次元形状に限定した表示となるため、

- ・例えば、画面外やユーザの視点から不可視の面は表示されないため、データ全体の完全な形状が描画されない（図6）。

- ・OpenGLを使用していないCADには適用できないなどの制約が、使用するCADによって起こる。この方法はCAD画面上に移っている形状をそのままCOSMOSにて表示する用途に対しては手軽に利用しやすいが、評価の対象や内容によっては利用できない場合がある。

2.2 データ交換用形式による伝送

異なるCADシステム間でのデータ交換に使われる、いわゆる「中間形式」のファイルを作成し、伝送する方法である。前節の方法を利用する以前には主流であった。

CADからは通常「エクスポート」と呼ばれる機能を使ってDXFやVRMLなどの中間形式で3次元形状をファイルに保存し、COSMOSのモデルビューアでそのファイルを読み込んで解析（インポート）することで表面情報を解釈し、形状を立体視で再現する。従来はPCで保存したファイルをFTPプログラムでCOSMOSに転送する手間があったが、ファイル共有システムSamba^[3]が提供するフォルダに保存すれば、モデルビューアがファイル更新を検出して読み直し、すぐにCOSMOSに反映することもできる。

図2で示したようにCOSMOS設置当初から利用されているこの方法にも、いくつか問題がある。

- ・中間ファイルに書き出した時点で、その形式でサポートされていない内部データ（例えば質感など）が欠落することがある
- ・曲面が正確に伝わる中間形式でない場合、多数のポリゴンで近似することになり、COSMOS側の描画が増大して没入感に支障が生じる

これらは、中間形式を出力するCADとCOSMOSのモデルビューアとの相性に起因する問題であるため、これまでローダプログラムの改良や変換フィルタの開発などに加え、CADデータ作成元のオペレータ（ユーザ企業）側の努力と工夫によって克服してきた背景がある。しかし今後は、業界が利用するCADがバージョンアップなどにより

変更されれば、この問題に関する状況が改善する可能性も、悪化する可能性もある。いずれにしても、COSMOSで対応するためには研究開発が必要であるが、対症療法的になるため、根本的な解決は困難である。

2.3 データ保存用形式による伝送

近年のCAD製品の中には、データを作成、編集することができる本体製品と、データを閲覧することだけができるビュー製品に分かれて販売または頒布されているものがある。このビュー製品は、本体製品で作成し保存したCADデータを完璧に再現することができる。なぜなら、CADの標準的なデータ保存用形式には、形状に関する完全な情報が保存されており、ビュー製品はその情報を読み込んで忠実に描画できるからである。

同じ考え方で図5のようにCOSMOS用にCADデータ専用ビューを開発すれば、先に示した2つの方法とは異なり、CADで保存した形状を確実に完璧に立体視で再現できる。また必要ならば、読み込んだCADデータに対してCOSMOS内で修正を加え、CADに持ち帰るために書き戻すことも応用上可能である。

ただしこの方法の実現のためには、

- ・開発者向けに提供されているCADの保存データ構造と含まれる形状定義情報の意味、展開式
- ・COSMOS(IRIX OS)で動作する、CADの保存データを確実に読み込んで描画するルーチン

の、いずれかが必要である。フリーウェアでは情報が公開されているものが多いが、業務に使われているCAD製品の中では該当するものが存在しない。CADデータをCOSMOSで閲覧するという本来の目的を達成するには、再現性、運用性ともに最良の方法であるが、実現にはCADソフトの開発元の協力が欠かせない。

3. CADデータ表示テスト

表2に、企業からCOSMOSへの表示要望があるCADや、研究所内の業務で利用するCADやCGソフトの現状での表示方法を示す。テストは、CADに付属するサンプルデータやチュートリアル用データなどがあればそれを利用し、無い場合は簡単な形状を作成してCOSMOSで表示する方法で行った。テストデータは必ずしもCADの全機能を使っていないため、CADデータの内容や作り方によっては結果が異なる可能性がある。また、現時点对応確認が取れなかったCADについて、今後データ交換手順の改善により対応可能になる可能性もある。

図7は、メガソフト社製3DインテリアデザイナーのデータをCOSMOSにリモートディスプレイ表示した時の状況写真である。COSMOSのユーザは、CADで作成した室内空間と同じ空間を、実寸大で立体的な仮想空間として体験できる。また、COSMOSの基本機能であるヘッドトラッキングによる回り込みは勿論、コントローラ操作によるウォークスルーにも対応している。



図7 3DインテリアデザイナーのCOSMOS表示

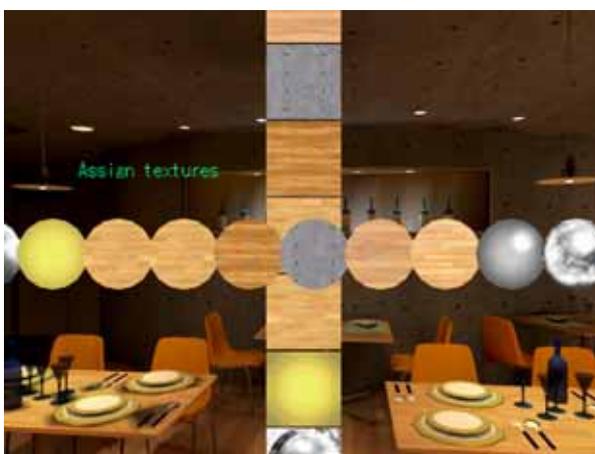


図8 テクスチャ割り当てインタフェース

さらに図8に示すユーザインタフェースを使って、テクスチャの割り当てを意図的に再配置することができるため、壁紙や床材の差し替え程度であれば、COSMOS内で行うこともできる。

4.まとめ

没入型6面ディスプレイCOSMOSの企業による利用目的の中で最も頻度が高いCADデータの3次元立体視評価利用に対する技術支援として研究開発を行ってきた、PC用CADデータをCOSMOSで表示するいくつかの方法の現状について、それぞれの長所と限界について考察した。手持ちのCADデータをCOSMOSで立体視表示することは、どのような業界においても目的や有用性に差はあっても、とりあえず興味を持ちやすい体験であると考えており、今後もあらゆる方法について改良の努力を続けていく予定である。

その上で、COSMOSを単なる立体表示としての利用に止まらず、地域企業からのニーズである実寸大3次元設計などの高度な需要を喚起し、更なるものづくりの高度化を進めたい。

文献

- [1] 浅野ほか, “バーチャルモックアップによる製品評価システムの開発”, 岐阜県生産情報技術研究所研究報告第3号, pp.29-32, 2002.
- [2] OpenGL ARB, “OpenGLプログラミングガイド”, アジソンウェスレイ, pp.2-3, 1993.
- [3] 日本Sambaユーザ会, <http://www.samba.gr.jp/>, 2005/3/4 現在.

表2 各種CAD製品等のCOSMOS表示方法

CADまたはビュー製品名[発売元]	表示結果
CATIA V5[日本アイビーエム]	以前から中間形式によって利用してきた実績があるが、リモートディスプレイ化による方法でもある程度表示可能。ただしその場合は、元のディスプレイで裏向きのポリゴンが見えないことがある。
Project Reviewer, AutoVue [コダマコーポレーション]	ともにリモートディスプレイ化で対応可。 ビュー製品ではあるが対応CADの種類が豊富な上、備品ごとの表示制御やサイズ変更などの簡単な操作が可能。
TOPview Light [コダマコーポレーション]	リモートディスプレイ化で対応可。 機械シミュレーションではアニメーションも可能。
3ds MAX [オートデスク]	リモートディスプレイ化は未対応だが、様々な中間形式での利用実績が豊富。 AutoCADの連携製品。
3Dインテリアデザイナー [メガソフト]	リモートディスプレイ化で対応可。 形状、テクスチャともに良好で、特に光源シミュレーション後のデータは非常に美しい。

住宅設計における実寸大立体視の有効性評価

大野 尚則 藤井 勝敏 大石 佳知*

Research on the Effect of Life-sized Stereo Display for housing design

Naonori OHNO Katsutoshi FUJII and Yoshitomo OISHI

あらまし 住宅設計において没入型6面立体視システムの利用により、設計データを実寸大かつ立体的に表示し、施工前に完成後の状態の体験や評価が可能である。本報告では、実際に住宅を建築中の方の協力により、住宅設計工程において本システムを利用し設計検討を行い、システムの有効性の評価を行った。今回は、住宅設計の初期工程である空間設計へ適用し、これまでパース図やPCモニタの画面などでは難しかった窓や柱位置、天井の高さなどによる部屋の広さ感覚の違いを提示する部分において有効性が確認できた。

キーワード 住宅設計, 事前評価, 没入型, 実寸大, 仮想体験

1. はじめに

工業製品の設計においては、コンピュータを活用した設計支援システム(CAD)が普及し、設計情報は紙媒体から電子媒体へと変化しつつある。更に現在ではCADの3次元化が進み、完成品のイメージ図をコンピュータで忠実に表示することができる。また、3次元CADを用いて作成されたデータは、表示や解析での利用に止まらず、試作や製品説明、取扱説明書作成などの後工程にも利用されるようになってきた。

一方、土木・建築分野についても、大規模な物件については、早くから3次元CAD技術や3次元空間を仮想的に再現できるバーチャルリアリティ技術(VR技術)が、顧客との事前検討や設計説明に利用されてきた。しかしながら、個人住宅などの小規模な物件については2次元図面の利用がほとんどである。これは3次元データと比較して2次元図面が携帯性や費用対効果に富んでいることや、実際の設計や現場での業務は作業者の技術や経験に依るものが多く、図面の情報量で十分であることが要因として考えられる。他方では工業製品化されたプレハブ住宅の様に住宅供給側においてはデータが3次元化されているにもかかわらず、顧客との設計検討には立面図のみで行われている例が非常に多い。

今後、住居に対する趣向やライフスタイルの多種多様化

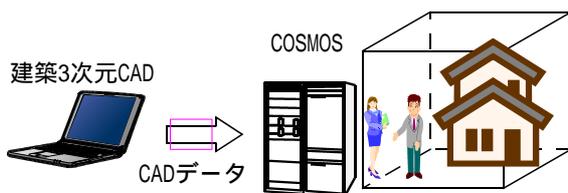


図1 COSMOSへのデータ表示

が進み、様々な顧客に応じた住宅設計や顧客が十分納得できる設計説明の必要性が高まっていくことは明らかである。

本稿では、3次元CAD技術とVR技術を利用した新たな設計手法について検討し、実際の設計工程においてこれらの技術を利用し、その有効性の評価を行った。

2. VR技術を用いた住宅設計工程

これからの住宅設計において重要な点は顧客のライフスタイル等のニーズを的確に設計に反映させることである。

したがって顧客と住宅供給側との設計検討は非常に重要である。しかしながら、現在では、そのほとんどが、住宅の間取り図や立面図、パース図を用いて行われている。顧客は、これらの図面から、その間取りの広さ、窓の位置、生活のための移動感覚等を実感として得ることができず、改築することが難しい箇所について建築後に後悔するケースが多い。

本研究ではこのような基本設計といわれる、顧客との打ち合わせを重ねて幾度もプラン変更を余儀なくされる段階において、間取りや空間構成を顧客へより正しく伝えるための技術として、VR技術を利用する。3次元CADで設計されたCADデータを立体的かつ実寸大に表示することができる没入型立体視システムCOSMOS^[1]の利用により、擬似的に完成後の住宅の住み心地を体感し、その有効性の評価を行った。

3. 評価実験

3.1 評価項目

住宅建築を検討中の施主を対象に、家族構成や住まいに対する考え、ライフスタイル、建設予定地、予算等についてヒアリングを行い、その情報に基づき平面上での間取り設計を行う。この設計情報に基づき、被験者と詳細な協議を重ねて基本設計をまとめ、CADによって3次

*有限会社アーキ・キューブ

元データを作成する。このデータを使用し、COSMOSにより実寸大立体視表示を行い、仮想的な3次元空間内にある住宅を被験者が体感し評価する(図1,2)。COSMOSを利用して行う評価項目は下記のとおり、主に2次元図面や口頭では理解が難しい設計箇所に関して評価を行う。

- 1) 空間構成：玄関ホール周り、部屋と階段の位置関係、生活(家事)動線
- 2) スケール感：各部屋の広さ、階段の位置の違いによるリビングの広さと使い勝手、吹き抜けの大きさと部屋の天井高、ダイニングカウンターと後ろの通路の幅
- 3) 視野：中庭から見えるキッチンの視角、キッチンから玄関の見通し

3.2 評価

図3の建築物を対象に評価を行った(図4)。評価可能となった項目は以下のとおりである。

- 1) 空間構成・・・総合評価 2.5(3段階で各項目を評価)
 - 玄関：玄関ドアの位置の違いによる空間印象の変化
 - 収納：収納位置による使い勝手の違い
 - 階段：階段位置による居住空間の変化
 - 動線：生活動線(家事、高齢者)の距離感の確認
- 2) スケール感・・・総合評価 3.0(3段階で各項目を評価)
 - 図面上では広く感じる空間が、現場等では若干狭く感じることが多いが、本システムにより現場と同様なスケール感が得られた。
 - 玄関：坪数や畳数では表現が難しい部分の広さ確認
 - 頭上：吹き抜けの有無や天井高による広がり感の確認
 - 部屋：ダイニングの広さとその印象の確認
 - ロフト：天井の高さと広さの確認
 - 収納：2Fに設置する床下収納の形状と大きさ
 - 階段：勾配の確認
- 3) その他・・・総合評価 2.8(3段階で各項目を評価)



図2 没入型6面立体視システムCOSMOS



図4 設計検討風景

視線：外や玄関からの宅内の見え方と目隠し検討
道路から玄関までのアプローチ

全体：家の全体印象(木造従来工法の柱・梁の様子)
機能性：採光場所(窓など)の確認

3.3 課題

- 今回の実験により、下記の機能の必要性があげられた。
 - 移動方法：現在、ゲーム用のコントローラを用いており年配者に操作が難しい。
 - 空間評価：所有する家具を配置することによるスケール感の向上
 - 色評価：壁の色の違いによる印象評価機能

4. まとめ

住宅設計の基本設計の検討において実際に建築予定の案件の検討作業にCOSMOSを利用しその有効性を評価した。

図面やモニタ画面では判断が難しかった複数案の設計提案からの迅速な選択や、部屋毎の広さ感が実感できたことがわかり、顧客に対する設計や完成印象に対する説明が容易となった。住宅完成後(図5)、更に比較検討を行う予定である。

課題として、仮想住宅内での移動方法や視点切り替えが誰にでも直感的に行える手法の開発や、必要性が高い機能として基本設計の後工程となる壁の色の違いによる部屋の印象変化の確認機能や、所有する家具のレイアウト機能などがあげられた。

なお、本研究は住宅を建築中の方の協力によるものであり、ここに感謝の意を記す。

文献

- [1] Toshio Yamada et al., "Development of Complete Immersiv e Display: COSMOS", International Society on Virtual Systems and MultiMedia, vol.2, p.522-527, Nov.1998



図3 検討対象物件



図5 建築中の住宅

コンピュータグラフィックスにおける 布の質感表現の改善

藤井 勝敏 大野 尚則

CG Painting Method for the Feel of Clothes

Katsutoshi FUJII Naonori OHNO

あらまし 仮想縫製システムにおける布生地コンピュータグラフィックスによる表現を改善した。縫製シミュレーション技術により衣服の3次元形状を算出する製品が販売されているが、コンピュータにて衣服形状を描画した場合、従来技術では実時間で実際の布に見られるような厚み感、ボリューム感を表現することは困難であった。本研究では、仮想縫製システムの描画処理に専用の画像処理機能を追加することでこれらの改善を行った。その結果、実際の布生地に表れる起毛感を擬似的に発生させることができ、仮想縫製システムにおける衣服の表現能力が向上した。

キーワード 仮想縫製システム, 布生地, OpenGL, 起毛感

1. はじめに

仮想縫製システムとは、型紙(パターン)に従ってコンピュータ上で裁断、縫製を行い、布生地の物性値を基に力学計算を行って、人台(ボディ、マネキン)等に着付けた状態の3次元形状をコンピュータグラフィックス技術(以下、CG)により表示するシステムである。岐阜県ではアパレル産業のIT化推進のため、試作に関わるコストおよび時間の削減を目的に産官共同で研究・開発を行い^[1]、平成12年にi-Designer (図1)として発売以降、現在までに教育機関を中心に普及が進んでいる^[2]。

一方で、この製品を見た繊維業界関係者から寄せられた意見の中にはシミュレーション結果の表示品質が実際の布とは全く異なり、試作品の評価の代用にはならない

との指摘がある。そこで本研究では、仮想縫製システムで算出された衣服の3次元形状を利用した専用の画像処理を追加することによって布生地の表示品質を改善する方法について研究し、その結果、実際の布に見られるような薄い起毛感や近年流行しているファー(fur:ウサギ毛皮状の生地)のような長毛の表現を試みたので報告する。

2. CGによる布表面の質感表現

仮想縫製システムが生成する画像は、3次元グラフィックスライブラリOpenGL^[3](以下、OpenGL)を用いて、力学計算が終わった三角形群(ポリゴン)に適切な陰影付けとテクスチャマッピングを施し描画している。このテクスチャマッピングには、布の質感を高めるために、スキャナやデジタルカメラ等で取得した本物の布生地の画像を用いているが、実際には模様が印刷された紙細工のような質感表現となっており、高い質感を得ることは困難であった。これは、模様を貼り付けた厚みのないポリゴンを座標変換して描画するテクスチャマッピング処理の限界である。

ところで近年のグラフィックス技術分野では、テクスチャマッピングに関して驚異的な進歩により、バンプマッピング、ディスプレイメントマッピングなどの高度なテクスチャマッピング技法^[4]によって、動物の毛皮や爬虫類の表皮などの表現の高度化が進んでいる。仮想縫製システムにこれらの技術を導入することを検討した結果、以下の2つの理由により見送った。

最初の理由として、最新のグラフィックスハードウエ

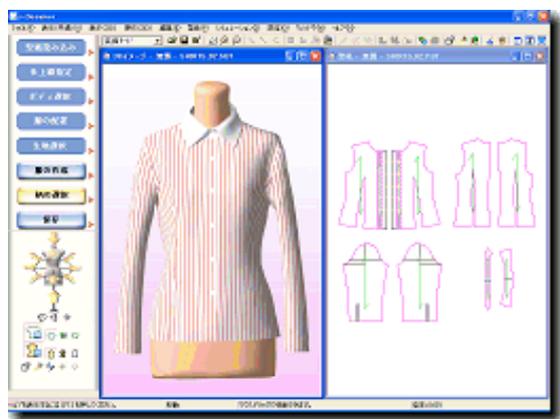


図1 仮想縫製システム i-Designer

アでは高度なテクスチャマッピング処理技術が搭載されており、仮想縫製システムの描画処理を機能拡張することで導入できるが、現行の仮想縫製システムのユーザが保有している大部分のハードウェアでは動作しないため、この方法をとった場合、ソフトウェアのバージョンアップに合わせてハードウェアの更新までもユーザに求めることになってしまう。

2つ目の理由として、このような処理を行うレンダリング専用ソフトウェアと連携する方法が考えられるが、価格設定上の問題に加え、仮想縫製システム以外の外部プログラムを起動して操作する必要があるため、ユーザの負担が大きくなる。

そのため今回は、

- ・仮想縫製システム発売当時(平成12年)からのユーザが持つハードウェアすべてに対応したソフトウェア処理とする、
 - ・従来の仮想縫製システムの操作感を変えない
- の二点を重視して、布の質感表現の向上を目指し改善を行った。

3. 改善方法と実装

仮想縫製システムが生成する衣服画像の問題点は、前述のような厚み感が無いことである。そこで、厚みを感じられるように布の表面から淡い毛状のピクセルを書き加える画像処理での改良を試みた。毛の長さや濃さ、曲がり方はパラメータとして設定できるようにし、表現したい素材に合わせて調整できるようにした。この画像処



図2 従来の描画(左)と改善後(右)

理による処理結果を図2(右)に示す。特に長めの毛を描画処理すると、図3のような毛皮風の表現ができる。この画像処理は、従来どおりのi-Designerの操作をすれば自動的に行われるため、新しい操作を習得する必要がなく、従来のユーザに違和感を与えない。

4. まとめ

仮想縫製システムにおける布生地を描画方法について、現在のユーザのハードウェア環境を鑑みて最も適切と考えられる方法で改善を検討し、画像処理ルーチンを開発、実装した。その結果、衣服形状の表面上に毛の層があるかのような「ぼかし」効果が発生し、無処理の画像に比べ、布生地のような厚み感が得られるようになった。

なお本研究開発は、株式会社テクノアからの受託により実施した。また本稿に掲載した画像の作成元となった衣服形状およびボディ形状については同社の厚意により拝借したものであり、ここに感謝の意を表す。

文献

- [1] 遠藤他, "仮想縫製システムの研究開発", 岐阜県繊維試験場研究報告書, pp.14-18, 1999.
- [2] 株式会社テクノア, <http://www.i-designer-web.com>, 2005/3/31現在。
- [3] OpenGL ARB, "OpenGLプログラミングガイド第2版", pp.318-319, 1997.
- [4] 本多直人, "GPUを使いこなすシェーダプログラミング", Cマガジン2月号, pp.18-37, 2005。



図3 毛皮風表現

誰にでも使える作業指向型ユーザインタフェースに関する研究

大野 尚則 棚橋 英樹

Study on a easy interface for 3D viewer

Naonori OHNO Hideki TANAHASHI

あらまし 現在、コンピュータソフトウェアは様々な分野において利用され、各業務に適した機能拡張が進んでいるが、入力装置においては必ずしもソフトウェアの使用目的に対して最適とはいえない。本研究では、工業分野で多く使われているコンピュータによる設計業務等を直感的に行うための入力装置の開発を目的として、今回、モニタ画面上に3次的に表現されたモデルの操作や3次元空間内での視点位置・方向指示を容易に行うためのシステムを試作したので報告する。

キーワード 入力装置, 3次元, 設計

1. はじめに

コンピュータに対する指示入力装置としてキーボードやマウスは最も多く利用され、現在では必要不可欠となっている。前者はテキスト入力に特化しており、後者はモニタ画面の2次元平面上での指示入力については直感的に操作でき、優れた入力装置である。

近年、コンピュータグラフィックス技術の発達により、パーソナルコンピュータ(PC)による高精度で高品質なグラフィックス描画が可能となってきた。特に、デザインや設計分野においては、3次的に設計する必要性も高まり、これをPCで支援する3次元設計システム(3次元CAD)が普及している。

これまで3次元CAD用の入力装置としてボールやダイヤル、スライドレバー形状を座標軸に対応させた装置や、指示デバイスの3次元位置・姿勢を超音波によって取得し、その情報により入力する装置等、様々な入力装置が市場に存在するが、費用対効果に優れたものは無く、現在でもマウスの利用が一般的である。しかしながら3次元的操作をマウスのような2次元的操作を用いて操作することは作業効率面から最適ではない。

本報告では、作業や思考を妨げないコンピュータ入力装置の開発を目的として、誰にでも直感的に3次元空間内のモデルなどを操作するための装置を試作し、家具レイアウトソフトウェアに適用したので報告する。

2. 入力装置の検討

2.1 従来装置の問題点

3次元CAD等の設計空間は3次元であり、その仮想的な空間中において設計作業は行われる。この場合、作業者が要求する位置や視点のデータを画面上に表示することは容易ではない。これは、3次元空間の自由度が6軸であるのに対して、マウスなどの従来装置は6軸の入力に対応しておらず、装備されているボタンの切り替え

により、操作していることに起因する。マウスを用いて設計空間内を現在の位置から特定の位置へ移動する場合、平行移動、回転などの操作をボタンで切り替えながら行う必要があり、非常に煩わしい操作を強いられる。

2.2 3次元入力手法の検討

3次元空間への入力、人の空間知覚の観点から前節で述べたように空間直交座標系の6軸に対応していることが望ましい。空間の操作に関しては、主に設計時やプレゼンテーション時のデータの注視や閲覧で行われることから精度が要求されることは少ない。精度以上に、作業者の要求する場面への移動速度や操作の容易さが求められるため、直感的な入力方法が望ましい。

没入型立体視システム「COSMOS」¹⁾のように、設計空間内に作業者が入り込んでの操作も可能であるが、人が実際に移動できる範囲は限られており、それ以上の空間内の動作については、やはり従来装置を用いざるをえず、3次元空間の操作に同様の課題が残る。以上のことから従来の入力装置を介している以上、いずれの環境下であっても同様の課題が残る。

したがって、本研究では前述の問題点を考慮し、1)6自由度の入力が可能、2)従来入力装置を使わない、2)3次元空間や空間内のデータを直感的に操作が可能、の3条件を満たす3次元入力方法を提案する。

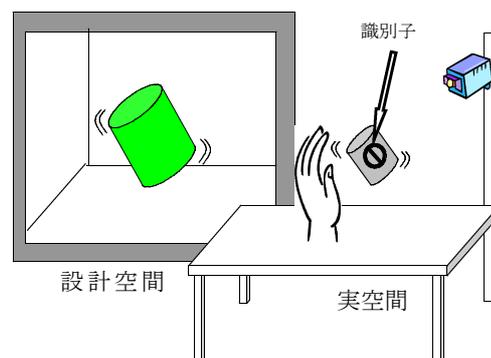


図1 CCDカメラによる入力

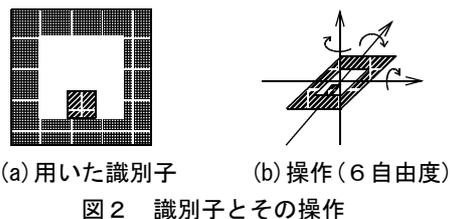


図2 識別子とその操作

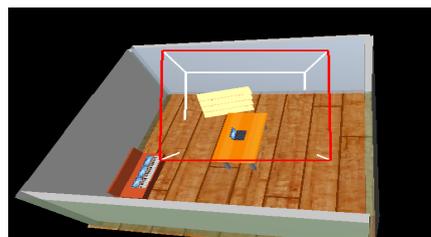


図3 白い棚を移動している様子

3. 直感的な入力方法

3.1 入力手段の検討

本研究では、PC内の設計空間を実空間に置き換え、実空間中の6自由度の動きを直接、設計空間へ反映させることでモデルデータを操作する方法を検討する。

実空間中の動作検出に関しては、前述したように精度よりも反応速度が要求される。従来型の超音波などの特殊な機器を用いた手法も考えられるが、マウスと比較して、費用対効果の点で利用されることは少ないであろう。本研究では費用面や利便性からも優位性が高いCCDカメラを利用する方法を用いた方法を考える。図1のように識別子を用いて、実空間でのその動きをCCDカメラで常時捉え、フレーム画像の画像処理を行い、識別子の位置と姿勢を算出する方法を採用する。検出された識別子の実空間での位置と姿勢とPC上での設計空間との対応付けはモデリング変換行列にて1対1に対応させることができる。これにより実空間の識別子の動きを、そのまま設計空間のモデルデータの動きに連動させることができる。

3.2 システム構成

これを実現するためには、1)実空間の画像を取得するCCDカメラ、2)得られた映像から識別子の動きを検出する画像処理機能、3)3次元データと対応付けされた識別子、4)モデルデータを3次元表示する機能が必要である。

- 1)CCDカメラ：Web用30万画素CCDカメラを使用する。
- 2)画像処理機能：得られたフレーム画像毎に、識別子の位置・姿勢を検出するため、ARToolkit^[2]を用いる。ARToolkitはビデオやカメラから得られる実映像に3次元データを重ね合わせて表示するためのソフトウェアライブラリであり、実映像内に識別子が存在する場合にその識別子上に3次元データを重ね合わせて表示することができる。本研究では、CCDカメラと識別子の相対位置・姿勢を算出するために使用する。
- 3)識別子：モデルデータと一対一で対応させたARToolkitで用いられる識別子(図2)であり、今回はカードに識別子を貼り付けた。これをカードではなく、3次元データの形状に近い実モデルとすれば、より直感的に操作できる。
- 1)3次元表示機能：設計空間を表示する機能とARToolkitの本来の用途である実映像に重ね合わせて表示する機能を設けた。前者の機能はCOSMOSに表示可能である。

4. 家具レイアウト検討への適用

試作した入力装置を家具のレイアウト検討ソフトウェアに適用した(図3)。各家具のデータと識別子を対応付けさせ、識別子を実空間で操作することで、それに連動して設計空間内のモデルデータ等の移動・回転ができる。今回、識別子の種類として、基準範囲設定用(背景となる部屋)、操作用(家具と人)の2種類を設定し、動作実験を行った。基準範囲設定用については、部屋の平面図の脇に識別子を貼り付けることで平面図の範囲を操作用識別子のコンピュータ内の可動範囲とした。3次元データと対応させた異なる識別子の貼り付けられた図面に入れ替えることで、別の背景を設定できる。

課題として、識別子を一度に複数種類使用した場合や、可動範囲を広範囲に設定した場合に、識別子の検出が不安定になることがあった。これらは、CCDカメラからの画像から、識別子を鮮明に検出することができないことが要因となっていると考えられるため、識別子の検出範囲と識別子のサイズ、また得られるフレーム画像の画素数の相関関係について今後調査する必要がある。また、識別子の貼り付け位置によってはCCDカメラからの死角が発生するため、複数カメラの利用や操作対象物に同種の識別子を複数貼り付けるなど、死角を減らすことを検討する必要がある。

5. まとめ

コンピュータ内の3次元空間内の操作を、一般的なPC環境下で実現できる直感的な入力装置を開発した。本装置は、実環境に存在する識別子を貼り付けたカードやモデルを移動や回転することによって、これに追従するようにコンピュータ内の3次元データを移動、回転する入力装置であり、簡単なアプリケーションでその動作を確認した。

今後、識別子の安定的な検出方法の検討と、今回は3次元空間内の移動・回転操作の入力に限定したが、3次元データの閲覧機能の追加を検討していく予定である。

文献

- [1]Toshio Yamada et al., "Development of Complete Immersive Display: COSMOS", International Society on Virtual Systems and MultiMedia, vol.2, p.522-527, Nov.1998
- [2]Hirokazu kato et al., "ARToolkit", <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>, 2000

RFIDタグを用いた位置センシング手法の検討

実環境重畳型ユビキタス情報提示システムに関する研究

山田 俊郎 棚橋 英樹

Study on a position measurement method using RFID tags

Ubiquitous display which superimposes on the real world

Toshio YAMADA Hideki TANAHASHI

あらまし インターネットに代表されるように、大量の情報がコンピュータネットワークを通してもたらされる昨今、利用者が必要とする情報を必要な時、必要な場所で提供するユビキタスコンピューティングに関心が集まっている。これを実現するには、「時」と「場所」を特定する必要があり、「時」を特定することは容易である反面、「場所」を特定することは難しく、簡易な位置計測技術の開発が望まれている。本報告では、無線式の電子タグ(RFID)を用いて、屋内環境における場所を特定する手法を提案する。タグの密度によって2種類の方法を検討し、低密度の手法においてはロボットの制御に用いた利用例を示し、高密度の手法においては位置座標取得の精度について報告する。

キーワード ユビキタス、位置情報、オーギュメントッド・リアリティ(AR)、RFID

1. 緒言

インターネットに代表されるように、大量の情報がコンピュータネットワークを通してもたらされる昨今、利用者が必要とする情報を必要な時、必要な場所で提供するユビキタスコンピューティングに関心が集まっている。ユビキタスを直訳すると、「偏在する」という言葉に訳され、情報の分野では、いつでもどこでも情報化の恩恵にあずかることのできる環境のことを意味している。しかしながら、コンピュータに蓄積された多くの情報の中から利用者の必要な情報を選択することには課題が多く、Webの検索でなかなか思い通りの情報が得られないことは多くの人が経験している。特にコンピュータの利用環境を限定しないユビキタス環境は、デスクトップコンピュータのような操作を前提としておらず、利用者にキーボード操作などの負担をかけずに自動的に情報の検索と取得が行える手法の開発が望まれている。

本研究では利用者の位置を情報検索のキーとして、利用者の位置に応じた情報を実環境中に表示する手法の開発を行っている。技術的には、位置情報を自動的に取得する技術と、小型プロジェクタによる情報表示技術の2つの点について開発を行っている。図1はこの技術による将来的なイメージを示したものであり、火災現場において避難経路や消火に必要な情報が実際の環境に重ね合わせて表示されるものである。

本年度は、位置情報の取得技術に焦点を絞って、屋内

環境において無線電子タグ(RFID)を用い、2次元位置情報を自動的に取得する方法を提案する。適用する環境の広さに応じて、タグの密度を変えた2通りの手法を提案し、低密度広範囲のものをロボットの移動制御に応用した例を示すとともに、高密度配置における位置精度について検証を行った。

2. 実環境中の位置情報の取得

2.1 位置情報取得手法の現況

現在、位置を取得する手法はいくつか提案されており、屋外においてはGPSが一般的な手法になっている。GPSは地球上のどこでも使用ができ、最高で数10cmの計測精度があるため、屋外の多くの利用シーンでは十分な機能であると言える。しかし、GPSの電波は建物内には届き

実環境重畳型ユビキタス情報提示システム
火災時における利用イメージ



図1 ユビキタス情報提示の利用イメージ

にくく、電波条件の悪化は計測精度の低下につながる。

屋内環境における位置センシングには、超音波式やレーザー光線をスキャンする方式、無線LANの電波強度を用いる方式、カメラで撮影した画像から画像処理によって位置を求める方式などがある。超音波式のもの計測精度が数cm、レーザー式では数mmであるが、どちらも環境側に大掛かりな設備の設置が必要である。無線LANを用いるものは比較的簡易なシステムではあるが、環境による電波強度の変動が大きく、計測精度はアクセスポイントを置く間隔程度である。カメラを用いる方法は、近年のカメラの低価格化から安価にシステムが構成できるものの、撮影条件によって精度の変動が大きく、カメラから見て対象が陰になると測定が不可能である。

このように既存の手法には問題点が多く、簡易な装置で10cm程度の位置精度をもった手法の開発が求められている。そこで、我々はRFIDタグをマーカーとして床に敷き、位置情報を取得する手法を検討した。

2.2 アクティブRFIDタグを用いた位置センシング

RFIDタグを床面に多数配置して位置を取得する試みは廣瀬ら^[1]によって行われており、1.5m間隔でタグが配置された空間で実験が行われている。ここでは、バッテリーを内蔵したアクティブ型のRFIDタグ(図2-a)が用いられており、タグのID情報を乗せた300MHz帯の電波が一定の時間間隔でタグから発信される。この電波強度を計測することでタグ間隔の半分の精度(0.75m)の位置計測を実現している。しかし、アクティブ型のタグを床面に設置するには、バッテリーを含む電子回路を保護するパッケージが必要であり、図2-aの例ではパッケージの直径が約15cmで、約5cmの深さに埋設する工事を行っている。また、バッテリー駆動であるため一定期間後にはバッテリーの交換が必要であり、この寿命は電波発信間隔に依存し、計測の追従性を上げる(間隔を短くする)とバッテリーの寿命が短くなる。

2.3 パッシブRFIDタグを用いた位置センシング

パッシブ型RFIDタグはバッテリーを持たないタグで、ICチップとアンテナのみで構成される非常に小型・薄型のタグである(図2-b)。タグを駆動する電力はリーダ側から電磁誘導やマイクロ波で供給され、一般に13.56MHzと2.45GHz帯の周波数が使われる。13.56MHzタイプのシステムは電磁誘導で電力の供給と通信を行い通信距離は数

十cmである。一方、2.45GHz帯のシステムではマイクロ波で電力の供給と通信を行い通信距離は1~2mである。しかし、この数字はリーダのアンテナ正面の理想的な位置にタグが存在する場合の値であり、実際にはリーダのアンテナとタグの向きや電波の反射など環境からの影響によって、実用距離はこの半分以下程度である。

今回、パッシブ型のタグを床に複数貼り付け、その上をリーダが通過することで位置を検出する手法を開発した。使用したタグの周波数は、通信距離が長いこととタグが小さいこと、および後述する電波の偏波方向が利用できることなどから、2.45GHz帯を採用した。理想的には、測定対象とする空間の床面に密にタグを敷き詰めることで任意の位置をセンシングすることが可能であると考えられるが、貼り付け作業や位置とIDの対応付けに膨大な作業量が必要となり現実的ではない、そこでタグの貼り方によって、2種類の手法を検討した。すなわち、広範囲の位置センシングを目的として、離散的なタグの貼り付けで位置センシングを行う手法と、センシング精度の検証のために、限られた範囲に高密度でタグを貼り付けた場合の位置センシングについて、その有効性を検証した。

3. 広範囲離散的タグ配置による位置センシング

3.1 広範囲の位置センシング

数十mにわたる広範囲で位置計測が必要な場合、全面に渡ってタグを高密度に貼り付けることは現実には不可能であるため、密度を落としてタグ貼り付けることが考えられる。しかし、タグ間の間隔を広げるほどリーダの読み取り範囲を外れる可能性が高く、ほとんど読み取れなくなる恐れがある。また、アンテナ-タグ間の距離が短い場合でもアンテナの指向性によってアンテナ正面から外れるほど読み取りが困難になる。そのため、位置情報を必要とする場所に集中的にタグを配置してその場所では必ずタグ情報が取得できるようにし、それ以外の場所の位置情報は別のセンサで補間する手法を開発した。

3.2 ロボット制御への適用

この手法を移動型ロボットの制御に応用し、図3に示す約50m×12mの空間を自律的に移動し、場所に応じた案内メッセージを話す機能を実現した。ロボットの詳細は



(a) アクティブ型 床面に埋設加工したもの
(b) パッシブ型(2.45GHz) 床貼用にパッケージしたもの

図2 RFIDタグ

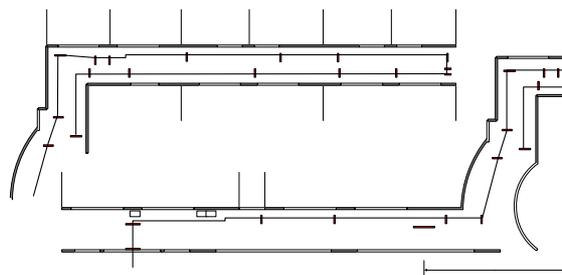


図3 ロボットの巡回経路とタグの配置

本報告書の「案内ロボットの開発」を参照されたい。

ロボットは決められた経路を巡回して、決められた場所で音声によって情報を呈示する。巡回路上の位置を決定するためにRFIDタグを5m程度の間隔で設置し、タグ間は車輪のエンコーダで位置を算出した。ロボットの底面には平面アンテナが下向きに取り付けられており、床面に貼り付けられたタグの情報を読み込む。床面とタグの間の距離は5cm程度であるため読み取りには問題のない距離ではあるが、アンテナの指向性により、アンテナの幅(約20cm)を外れると読み取りが不可能になる。そのため、タグは1箇所につき20cm間隔で巡回路を横切るように3~5枚設置した。

タグから得られる情報は16桁の数値であり、このタグIDを元にロボットの行動を制御する。同一箇所に貼られる複数枚のタグから得られるタグIDは、ロボット内のタグテーブルによって同一のグループIDに変換される。このグループIDは行動テーブルでロボットの行動命令列に変換され、ロボットを制御する(図4)。そのため、経路上のある場所の複数枚のタグのうちのどれを検出しても同じ行動が取ることができる。

厳密には、今回の制御方法ではロボットの位置座標を取得してはいない。しかし、タグによって行動の基準となる位置が同定されることで、経路上を外れることなく自律移動を行い、指定された場所で音声による情報呈示を行うことが可能となった。

4. 高密度タグ配置による位置センシング

4.1 電波方式の検討

通常、2.45GHz帯のパッシブ型RFIDタグのリーダには薄型のパッチアンテナが用いられ、円偏波方式の電波で電力供給を行っている。この偏波方式ではアンテナとリーダの向きに自由度を持たせることができ、向きが限定されていないタグから情報を読み取るには好都合である。しかし、理想的なアンテナ配置にある直線偏波の場合と比較すると、同一距離における電波強度は原理的に1/2になるため、通信距離は短くなる。図5はアンテナの違いによってタグリーダから放射される電波強度を測定した結果である。リーダに付属のパッチアンテナ(円偏波)と、2.45GHz帯を使用する無線LAN用の5素子八木アンテナ(直線偏波)の2種類を用い、電波強度はRFパワーメータ(HP 473B, 8482A)に1/2波長のダイポールアンテナを接続して、それぞれのアンテナの先端面からの距離による受信電力の変化を測定した。タグリーダは電波を断続的に



図4 RFIDによるロボットの制御

に出力するため、平均電力が測定されている。

測定の結果からも、直線偏波の方が受信側に多くの電力を供給できることがわかる。また、別の予備実験では、パッチアンテナの場合に安定して読み取れるタグの距離は約50cm、八木アンテナの場合で100cmであったため、この測定方法における-5dbmのあたりが安定してタグが反応する限界であると考えられる。ユビキタス環境のための人間の位置センシングでは、少なくとも腰の位置程度の高さ以上にアンテナを設置することが求められるため、通信距離の長い直線偏波の5素子八木アンテナを採用することとした。なお、アンテナの変更によって、電波を使用するリーダの総務省技術基準適合証明が無効になるので、実験はすべてシールドルーム内で行った。

4.2 床面設置タグの検討

直線偏波はその特性から送信側アンテナと受信側アンテナが平行な場合に最も感度が良く、角度が増すごとに減少し、直交すると0になる。つまり、同じ距離にあってもアンテナとタグの向きによっては読み取りができない現象が発生する。そのため、床面に設置するタグは図6-aのように4枚のタグを45度回転させたタググループを1組として床面に設置することとした。このようにすることで、リーダとタグのアンテナがなす角は22.5度以内となり、リーダのアンテナの向きに関わらずタググループのIDが取得可能である。

また、タググループを用いることで、位置のみでなく向きも得ることができる。すなわち、タググループ内のどの向きのタグが反応しているかを知ることで、向きを取得することができる。向きが取得できることを確認するため、このタググループを回転台に乗せ、方向によって取得できるタグが異なることを確認した。電波が金属製の回転台の影響を受けないように、木製のスタンドで

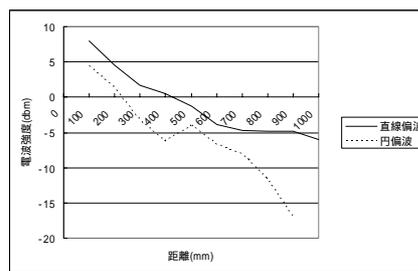
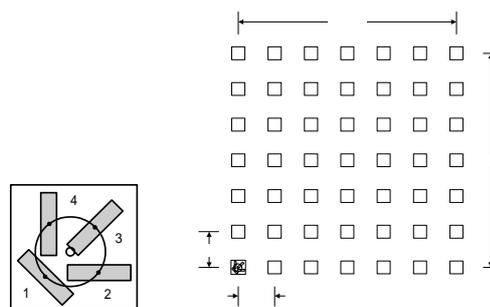


図5 直線偏波と円偏波の電波強度



(a) タググループ (b) タググループの配置
図6 タググループと実験フィールド

回転台の上面から20cmの間隔をあげ、その上に回転中心とタググループ中心が同じになるようにタググループを配置する。さらに、回転中心と電波の射出軸が同じでタグ面から70cm離れた上方に先端が位置するようにアンテナを設置した。この距離はタグを床面に配置し、アンテナを人の腰に設置する場合を想定している。

タグリーダはタグの反応回数をカウントしているため、PCから1秒おきにタグ情報を取得することで各タグの1秒間の反応回数を知ることができる。回転台を秒速2度の速さで回転させながら、反応したタグのIDと反応回数を測定した。この結果を図7に示す。タグの個体差によって反応の回数は異なるものの、タグごとにsin関数のような山形の軌跡を描いており、回転に応じてアンテナと平行な方向のタグが反応していることが確認できた。

4.3 位置精度の検証

前節のタググループを図4-bのように250mmおきに縦横7枚ずつ配置して、1.5m×1.5mの範囲で位置取得の検証を行った。シールドルームの床面直下は導体であるため、導体表面で位相が180度ずれた電波が反射され、床面の直近では電波強度が弱くなっている。シールドルームの床から距離をとるため、床面に厚さ12mmのベニヤ板と厚さ1.5mmのビニールシートを敷き、その上にタググループを置くこととした。電波強度の測定の結果、シールドルームの床面に直接タグを置く場合に比べて電波強度が約8dbm高くできることが確認された。

実験環境の様子を図8に示す。リーダのアンテナは木製の移動台に下向きに取り付けられており、タグ面から70cmの高さにアンテナの先端が位置するよう調整した。各タグが存在する座標はタグが属するタググループの

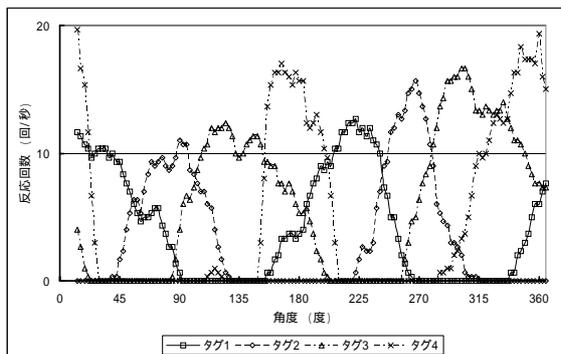


図7 タググループの回転に応じたタグの反応回数



図8 実験環境

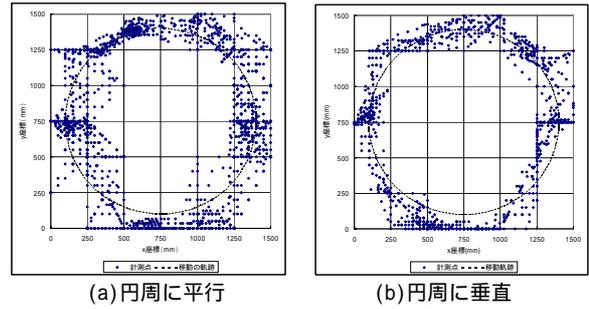


図9 計測点とアンテナの移動軌跡

中心点とみなし、タグIDとタググループのIDおよびタググループの位置は事前にPC内の変換テーブルに登録してある。また、タグの向きについても4段階の法線ベクトルで記述し、変換テーブルに登録してある。計測される測位点は、そのときに反応しているタグが属するすべてのタググループの座標から計算される重心位置とした。すべてのタグが同じ特性を持つのであれば、単位時間内に反応した回数によってタグまでの遠近および向きを推定することもできるが、今回の実験では前節の結果のようにタグの個体差が大きく、必ずしも反応回数がタグまでの距離を反映しないため、反応の有無のみを基準に測位を行った。また、向きについては、反応したタグの法線ベクトルの合成ベクトルの向きを計測方位としている。

この実験フィールド上で、(750mm,750mm)を中心に、半径650mmの円周に沿ってアンテナを移動させたときに測位された点の軌跡を図9に示す。図9-aはアンテナの偏波方向が円周方向に平行な場合の結果であり、図9-bは偏波方向が円周方向に垂直な場合の結果である。どちらも5回分の測定点で平均化処理を行っている。結果を見るとおおむね円周に沿った形で測位されており、図9-bの場合でアンテナが移動した円の半径に対する測位点の平均誤差は75mm程度であった。中にはタググループ1つ分(250mm)以上ずれている場合もあるが、そのような点は例外的で、多くは円周に近い点が計測されていたことがわかる。

5. 結言

本報告では、実環境重畳型ユビキタス情報提示システムを実現する上の要素技術である、パッシブ型RFIDを用いた位置センシング手法を開発し、ロボット制御への応用を示した。また、計測精度の評価では、提案手法はタグの個体差に左右される部分はあるものの、実験では平均誤差が75mmであり、簡易なシステム構成であるにもかかわらず、評価できる位置計測結果となった。

文 献

- [1] 小林, 雨宮, 檜山, 山下, 廣瀬, "RFIDタグを用いた位置情報取得システムの精度向上に関する研究", 日本バーチャルリアリティ学会ウェアラブル/アウトドアVR研究委員会第3回研究会, pp. 1-2, 2003.

写真とCGの自然な合成ツールの開発

棚橋 英樹 山田 俊郎

Development of a CG superimposing tool over photo images

Hideki TANAHASHI Toshio YAMADA

あらまし 工業製品の設計評価段階において、製品のコンピュータグラフィック画像(CG)を、使用環境の中に合成したCGは周囲との調和について評価できるため、デザイン検討やプレゼンテーションに効果的である。自然な合成画像の作成にあたっては、実環境の写真撮影時と同じカメラの位置・向き・画角でCGを作成する必要がある、これらパラメータを容易に同定することが求められている。特に見た目を評価する段階では、合成画像の精度よりも作成作業の容易さが運用上のポイントとなる。本報告では、デザイン検討やプレゼンテーションに利用可能な精度の合成画像を容易に作成するためのツールの開発とその評価について報告する。

キーワード 3次元CAD, 合成画像, コンピュータグラフィック(CG), デザイン

1. 緒言

設計現場において3次元CADの利用が進み、形状をCGで評価することが一般的になっている。設計対象の形状だけを評価するのであればCGのみで可能であるが、その製品を使用環境においた場合の周囲との調和についての評価は困難であった。使用環境の画像はデジタルカメラの普及で容易に撮影できるようになっているため、実写画像とCGを組み合わせて使用環境中における製品の見栄えを評価することがデザイン検討および製品プレゼンテーションの上から求められている。

実写画像とCGを合成する際には、双方の画像のカメラパラメータが一致していないと不自然な画像になる。具体的には、被写体に対するカメラの位置と向きおよび焦点距離が一致していることが必要である。これらを一致させるには、一方の画像のカメラパラメータに合わせてもう一方の画像を取得することになるが、CG画像に合わせて実写画像を撮影することは困難であり、実写画像に合わせたCG画像の作成を行う方が容易である。従来、このようなことを行う場合、実写写真を見ながら人がレンダリングカメラの位置や向きをマウス操作で調整することが普通であり、パラメータを変えながら何度もCGの画像作成(レンダリング)を繰り返していた。レンダリングではこれらのパラメータは数値で与えることができるため、この数値を写真画像から求めることができれば自然な合成画像となるCGが作成できる。

本報告では、実写画像上にCGの合成を行う容易なツールを提案し、実作業を通して利用しやすさの評価と精度について評価を行った。

2. カメラパラメータ取得手法

1枚の写真からカメラパラメータを取得する方法はいくつか報告されているが^[1]、取得されたパラメータの精度向上を目指す学術的な研究が多く、容易に利用できる形で提供されているものは少ない。本ツールでは、Intel社のOpenCVライブラリを用いて、1枚の画像からカメラパラメータの取得を行うこととし、操作が容易なツールを作成した。

カメラパラメータを厳密に議論すると、位置、向き、焦点距離のみでなく、撮像中心や歪等も含まれる。このライブラリの使用にあたっては事前に使用するデジタルカメラに応じたカメラキャリブレーションが必要であるが、運用上キャリブレーション作業が困難であるため、

- ・撮像中心：写真の中心のピクセル位置
- ・歪：なし
- ・焦点距離：デジタルカメラのカatalogスペックから取得。一般に38mmフィルム換算の焦点距離が公開されており、これをピクセルに換算。



図1 格子パターン



図2 合成画像

と簡略化してキャリブレーションを省略した。最近のデジタルカメラは十分な性能を持っているため、簡略化しても実用上問題のない精度は保たれている。

写真撮影時には実際の空間の3次元位置と写真上のピクセル位置の対応が取りやすいように考慮する。例えば、図1のように格子状のパターンを置いて撮影を行う。撮影した画像から、5点以上の点で画像上のピクセル位置と実際の3次元空間中の位置を対応づけ、先のツールで計算することでカメラの位置と向きが求まる。図2は格子パターンの上にCGの直方体を合成した例である。周囲と違和感のないパースで合成されていることがわかる。

3. 提案ツールを用いた画像合成

提案ツールによる合成画像の作成手順は図3のとおりである。一見複雑に見えるが、格子パターンを用いて撮影すれば3次元位置計測は不要であるし、対応点取りの作業も容易である。これらの座標をファイルにまとめ、作成したツールでカメラ位置・姿勢を求めて、結果をコピー&ペーストで3次元CAD(Rhinoceros)のカメラパラメータに取り込むことができる。ここでレンダリングされるCGはPhotoshop等のフォトタッチソフトで容易に重ね合わせができ、影などの効果を加えて合成画像が出来る。図4は既存の家具(引き出し)の上に2つのオブジェクト(カメラとアヒルの置物)と左側に同サイズの箱を合成した例である。この場合、箱右側の引き出しに接している面は合成時にタッチソフトで削除している。CGのレンダリング時には実写画像との前後関係が反映されなため、CGよりも実写の方が前に来る場合はタッチソフト上で処理する必要がある。また、置物や箱の下に影をつけることで、より自然な合成となっている。

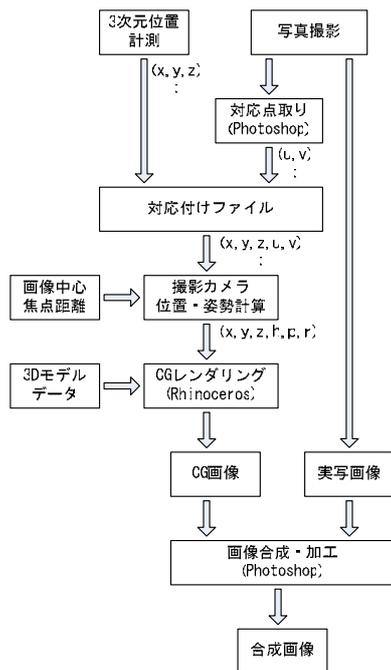


図3 合成処理の流れ



図4 Photoshopによる画像合成と加工

4. 業務利用における評価

作成したツールをLECIP(株)様の業務で使用して、手法の有効性について評価いただいた。図5,6は本ツールで運賃箱のデザイン評価および取引先への製品の提案に利用した例である。使用していただいた上での評価は、

- ・カメラの機種を限定しないため、営業所の担当者でも簡単に撮影ができて便利である。
- ・プレゼン利用に対しては十分な精度である。
- ・対応点取りからカメラ位置・姿勢算出までが1つのツールでできるようになると良い。

という意見が寄せられた。また、図6の例のように、大きさが既知のもの(ここでは下側の発券機)があればそれを指標とすることができ、格子パターンも不要である。



図5 運賃箱の合成 LECIP(株)様提供



図6 乗車口カードリーダー(上部)の合成 LECIP(株)様提供

5. 結言

提案ツールは業務で利用できる画像合成ツールとして、容易に使用できることを第一の目的として開発した。今後は評価意見も踏まえて、使いやすさの改善が望まれる。

文献

[1] 徐剛：写真から作る3次元CG，近代科学社，(2001)

IT/MT分野におけるシミュレーション技術の適用に関する研究

- 段ボール製品の強度解析技術に関する研究 -

川島 義隆 久富 茂樹 原田 匡人*

梅津 康義* 松井 和己** 手塚 明***

Research on the Application of Numerical Simulation in IT/MT field

-Structural analysis for corrugated fiberboard products-

Yoshitaka KAWASHIMA Shigeki KUDOMI Masahito HARADA*

Yasuyoshi UMEZU* Kazumi MATSUI** Akira TEZUKA***

あらまし 段ボール箱の設計において、その重要な項目の1つとして圧縮強さが挙げられ、従来より、段ボール箱の圧縮強さを算定するための各種の計算式が提案されている。一方、包装設計現場では、圧縮強度値の推定のみならず、実際の変形等の解析に対するニーズも強い。本報告では、段ボールシートの強度試験及びそれらの強度特性を用いて、LS-DYNAによる段ボール箱の圧縮強さの静的解析を行ったので、これらを報告する。

キーワード 段ボール箱，強度解析，LS-DYNA

1. 緒言

工業製品等の輸送や保管に使われる包装材料には、段ボール箱が広く使用されている。段ボール箱の設計において、その重要な項目の1つとして、圧縮強さが挙げられる^[1]。そのため、従来から段ボール箱の圧縮強さを算定するため、ケリカット式などの各種の計算式^[1]が提案されている。一方、包装設計現場では、最大圧縮強度値の推定のみならず、段ボール箱の積層による変形や落下衝撃などの動的特性などに対するニーズも強い。そのため、近年では、有限要素法を用いた段ボールの圧縮強度特性解析^[2,3]や落下解析^[4]などが行われている。本報告では、段ボールシートの強度試験及びそれらの強度特性を用いて段ボール箱の圧縮強さの静的解析を行ったので、これらを報告する。

2. 段ボール箱圧縮強度特性の有限要素解析

2.1 段ボールの有限要素解析

段ボール製品は多数の段で構成されているため、段構造を詳細にモデル化した場合、大規模モデルとなる。そのため、本報告では、その大規模化を避けるため、中川ら^[2,3]が行っているような段構造を詳細にモデル化せず、段ボ

ールシートを1枚の平板とみなし、箱圧縮の強度特性解析を行う。解析ソフトにはLS-DYNA^[5]を用いる。

2.2 段ボールシートの強度特性

段ボールの材料特性を同定するため、段ボールシートの垂直圧縮強さ試験（JIS Z 0403-2、試験片：幅90mm、高さ60mm）及び3点曲げ強さ試験（試験片：長さ200mm、幅50mm、スパン150mm）を行った。試験速度は10mm/minとし、標準状態（JIS Z 8703、温度23±1℃、湿度50±5%）で行った。

使用する段ボールは表ライナー（公称坪量170g/m²）、中芯（公称坪量120g/m²）及び裏ライナー（公称坪量170g/m²）で構成された外用両面段ボール（A段、厚み5.35mm）を用いた。試験結果を図1～2、表1に示す。

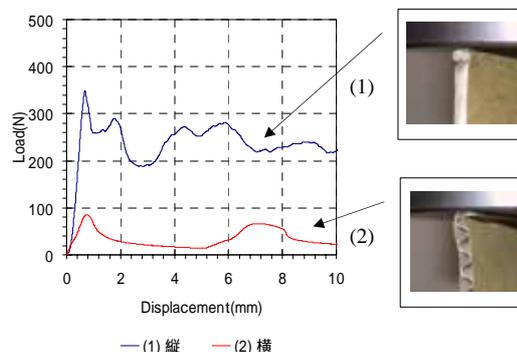


図1 段ボールシートの垂直圧縮強さ試験

* 株式会社日本総合研究所

** 横浜国立大学

*** 独立行政法人 産業技術総合研究所

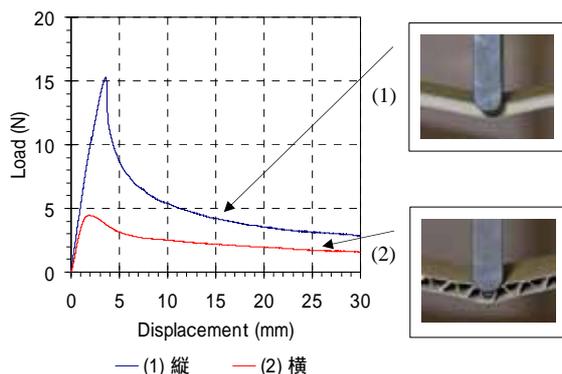


図2 段ボールシートの曲げ強さ試験

シートの圧縮及び曲げ強度特性から、それぞれの縦・横方向のヤング率を求め、それらを表1に示す。また、図1より、段ボールの圧縮強度特性の最大点以降は、ひずみの増加に対して最大荷重からの荷重増加はみられないことより、シートを完全弾塑性体^[6]とみなす。そして、箱圧縮強さは、主にシートの曲げ強さが大きく寄与していることから降伏応力は曲げ強度特性の最大点を降伏点とみなし、その点を降伏応力とする。せん断弾性係数は、ポアソン比 0 を仮定し、Campbell^[7]の式を用いた。

表1 段ボールの強度特性

段ボール	方向	最大強度(N)		ヤング率 (MPa)
		平均	標準偏差	
圧縮強度	縦	346.3	18.6	12.3
	横	79.2	9.8	7.0
曲げ強度	縦	14.7	0.8	466.5
	横	3.96	0.4	228.1

2.3 段ボール箱の圧縮強さ試験とその解析

対象とする段ボール箱は、0201形式、長さ 380mm、幅 300mm、高さ 234mm とする。試験方法は、包装貨物及び容器 - 圧縮試験方法 (JIS Z 0212, B 法) により行い、その結果、最大圧縮強さは平均 2919.8N、標準偏差 156.0N であった。

段ボール箱の有限要素モデルは、1/4 モデルとして対称境界条件を課し、剛体壁により上面からの圧縮及び下面の支持を行う。材料モデルは圧縮特性と曲げ特性を独立に扱える異方性弾塑性モデルを用いる。なお、メッシュは高さに対して水平方向に 0.1% の初期たわみ^[8]を与えている。

図3に試験及び解析結果を示す。解析と実験の変形モードはよく一致しているといえる。また、変位 - 荷重特性は解析においては、座屈後の反力が実験のそれと比べると大きい傾向を示しているが、最大圧縮強さは概ね近い値を示している。しかしながら、その変位量に関して解析のそれは実験のそれと比べると小さい傾向を示している。

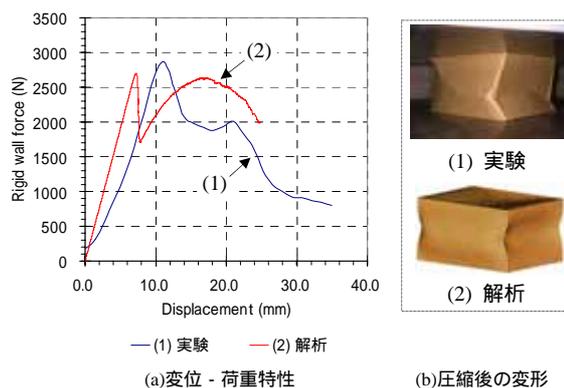


図3 段ボール箱の圧縮強さ試験とその解析

3. まとめ

段ボールシートの圧縮及び曲げ強度特性の実験値を用いたモデル化により、段ボール箱の圧縮強度特性解析を行った。その結果、解析と実験の反力傾向や変形モードを比較すると両者は概ね近い傾向を示した。今後は、シートの種類や形状等の異なった箱への適用を行い、その精度等を検討する必要がある。一方、シートは原紙の種類や段の種類などによりその種類は多岐に渡るため、今回の段ボールシートの実験値を用いたモデル化は多くの実験値を必要とする。従って、今後は均質化法^[9]等を用いたマルチスケール解析手法の検討が必要と思われる。

謝辞

本研究の遂行にあたり、段ボール関連資材を提供して頂いた協和ダンボール(株)の関係者の方々に深く感謝の意を表します。

文献

- [1]五十嵐清一, “2001年度版 段ボール包装技術入門”, (株)日報, pp116-146, 2000.
- [2]中川幸臣, 丹羽一邦, 筒井喜平, “段ボールの強度解析シミュレーション”, 包装技術, 41-3, pp217-220, 2003.
- [3]丹羽一邦, “ダンボール衝撃解析のための実験とシミュレーション方法”, LS-DYNA Users Conference 2001 講演論文集, pp.17-2-15-9, 2001.
- [4]前沢ら, “家電包装の非線形落下衝撃解析 (有限要素法の活用)”, 包装技術, 40-2, pp.195-198, 2002.
- [5]Livermore Software Technology Corporation, <http://www.lstc.com>
- [6]鷲津ら, “有限要素法ハンドブック 応用編”, 培風館, pp174-176, 1983.
- [7]Campbell, J. G., “The in-plane elastic constants of paper”, Australian J. Appl. Sci., 12-3, pp356-357, 1961.
- [8]池田ら, “構造系の座屈と分岐”, コロナ社, pp103-108, 2001.
- [9]寺田ら, “均質化法入門”, 丸善, 2003.

ヒューマノイドロボット「ながら - 3」の開発

稲葉 昭夫 光井 輝彰 久富 茂樹 田中 泰斗

小川 行宏 今井 智彦 張 勤

Development of a humanoid robot “NAGARA-3”

Akio INABA Teruaki MITSUI Shigeki KUDOMI Taito TANAKA
Yukihiro OGAWA Tomohiko IMAI Qin Zhang

あらまし わが国において世界的に例を見ない高齢化が進行する中で、労働人口の減少、障害者や寝たきり老人の増加、それに伴う介護者等の不足などから、福祉をはじめとする多くの分野において、各種の支援にロボットを利用することが強く期待され、これらロボットの関する市場は、21世紀に大きく成長すると予測されている。本県では、産業振興施策の一環として、ロボット関連技術の県内企業への蓄積を図ることを目指している。この1つの手段として、愛知万博での展示を目指したヒューマノイドロボットを県内企業と協力して開発する取組を実施している。本報では、この取組の中で開発したヒューマノイドロボット「ながら - 3」について報告する。

キーワード ヒューマノイドロボット、2足歩行、人とロボットの共存

1. はじめに

世界的に例を見ない高齢化が進行する我が国において、高齢者支援ロボットや福祉関連ロボットは、今後、市場の拡大が期待できる民生用ロボットの有力な候補である。特に、超高齢化社会においては、高齢者の自立を支援するロボット技術に大きな期待が寄せられている。

これらロボットの関する市場は、21世紀に大きく成長すると予測されている。本県では、産業振興施策の一環として、ロボット関連技術の県内企業への蓄積を図ることを目指している。この1つの手段として、愛・地球博での展示を目指したヒューマノイドロボットを県内企業と協力して開発する取組を実施している。本報では、この取組の中で開発したヒューマノイドロボット「ながら - 3」について報告する。

2. 「ながら - 3」の概要

本県では産業育成施策としてロボット関連産業の創出を目指し、(社)岐阜県工業会2足歩行ロボット試作特別研究会と共同で研究を進めてきたが、さらなる技術の蓄積を図ると共に、これまでの取組の成果を示す1つの手段として、愛知万博での展示を目指したヒューマノイドロボット「ながら - 3」(図1)を開発した。

様々なパフォーマンスを披露する「ながら - 3」の開発方針を次のように定めた。

- ・ 2足での移動
- ・ 全身を使った運動やジェスチャー

- ・ 動的な対象物の位置検出および、それに対するアクションの生成
- ・ 発話機能

3. ハードウェアの概要

開発したヒューマノイドロボット「ながら - 3」のハードウェアの概要を表1に示す。「ながら - 3」の身長は6～7歳程度のサッカー少年をイメージして約1,100mmに定めた。さらに、眼の部分に一对のCCDカメラを搭載すると共に、口の部分にスピーカを搭載した。



図1 「ながら - 3」の外観

表1 ハードウェア概要

身長	約1,100mm
体重	約25kg
関節自由度	29自由度(図2)
電源	内部電源(バッテリー) 外部電源での動作も可能

3.1 機構系

「ながら-3」の機構は、図2に示すように全部で29の自由度を有する。その内訳は、脚：6自由度×2、腕：6自由度×2、腰：2自由度、首2自由度、眼1自由度である。

脚に関しては、姿勢と位置を可動範囲内で独立に決めることのできる最低の自由度(1脚あたり6自由度)とした。腕に関しては、少ない自由度で可能な限り人に近い動きをするために、肩に3自由度、肘に1自由度、手首の回転に1自由度、手の平の開閉に1自由度の合計6自由度とした。腰に関しては、上半身の方向を変えるヨー軸とお辞儀等をするためのピッチ軸の2自由度とした。眼に関しては、周囲の状況を認識するために、左右のカメラの位置関係は固定し、両方のカメラが同時に動く機構とした。

また、各軸は、DCモータで駆動し、手のひらを除くすべての軸にハーモニック減速機を使用することにより、バックラッシュの少ない機構とした。これにより、歩行やジェスチャ等の動作をスムーズに行うことができる。

各軸の可動範囲および最大速度は、歩行機能、全身動作、全身を使用したジャスチャ表現に配慮し、表2のように定めた。

3.2 制御系

ヒューマノイドロボットは、多くの関節を同時に制御するとともに画像処理や行動計画の生成等多くの情報を処理する必要がある。このため、処理内容を複数のコントローラに分散して処理する分散制御を用いる。このこ

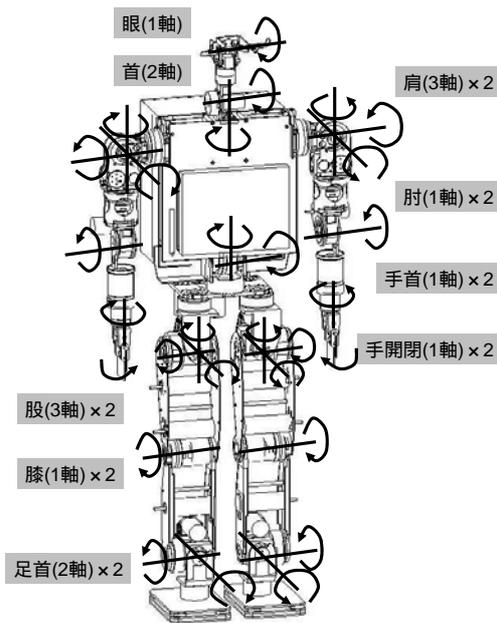


図2 ロボットの関節自由度

とにより、処理内容に応じて専用のコントローラを割り付けることが可能になり、システム全体のスループットの向上が期待できる。さらに、モータの近くにモータ制御コントローラが配置できるため、配線量を削減することが可能となる。図3に制御ハードウェアの構成を示す。モータ制御に関しては、2つのモータを同時制御可能なモータコントローラ(CPU SH2)を割り当てた。下肢運動制御に関しては、SH4を搭載したマイコン基板を割り当てた。上肢運動制御に関しては、アプリケーションコントローラと統合してSH4マイコン基板に割り当てた。画像処理に関しては、イメージプロセッサNVP-935N、音声処理に関してはDOS/Vボードを割り当てた。

また、体内LANには、1Mbps以上の高速通信が可能であること、マルチキャストな通信が可能であることおよび、実装が容易さからRS-485を使用した。

3.3 デザイン

ロボットにおいて、外観はロボットを印象づける大きな要素であることから、次のコンセプトに基づいて、デザイン開発を行った。

- ・ものづくりを象徴するメカニカル感と、人とのコミュニケーションを重視した生命感とが融合した、ハイブリッドなスタイリング
- ・感情や魂を感じさせる心臓の部分に電飾の窓を設置
- ・誰からも受け入れられやすい適度に丸みのあるフォ

表2 各関節の仕様

関節	可動範囲	最高速度
頭部(目)	ピッチ -8° ~ 2.5°	120°/sec
首	ピッチ -4.5° ~ 6.5°	200°/sec
	ヨー -10.5° ~ 10.5°	200°/sec
肩(上腕)	ピッチ -96.5° ~ 186.5°	200°/sec
	ロール -10° ~ 180°	200°/sec
	ヨー -90° ~ 90°	200°/sec
ひじ	ピッチ 0° ~ 120°	200°/sec
手首	ヨー -9.5° ~ 9.5°	200°/sec
手	ピッチ 0° ~ 15.0°	200°/sec
腰	ヨー -43.5° ~ 43.5°	200°/sec
股関節	ピッチ -8° ~ 4.5°	200°/sec
	ピッチ -9.0° ~ 4.5°	210°/sec
	ロール -3.5° ~ 1.5°	210°/sec
ひざ	ピッチ -4.5° ~ 4.5°	200°/sec
	ピッチ -4.5° ~ 14.5°	210°/sec
足首	ピッチ -7.5° ~ 7.5°	210°/sec
	ロール -3.0° ~ 1.7°	210°/sec

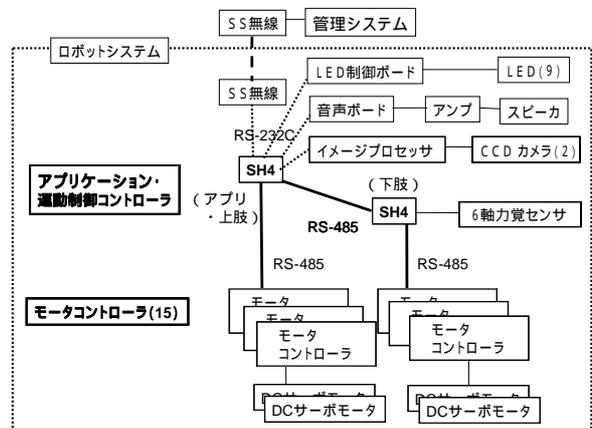


図3 制御ハードウェアの構成

ルムと身体プロポーションによる明るく親しみやすい雰囲気の演出

- ・山，川などの岐阜県を象徴したカラーリング

4. ソフトウェアの概要

ソフトウェアは、管理システム，アプリケーション，画像処理，音声処理，LED制御，上肢制御，下肢制御，モータ制御の各ソフトウェアからなる(図4)。

4.1 モータ制御ソフトウェア

モータ制御ソフトウェアは、下肢制御ソフトウェアまたは上肢制御ソフトウェアから体内LANを通じて受信した指令値に基づきモータの回転移動量を制御する。さらに、モータの現在位置およびその状態（発熱や衝突等）を計測・判別し、これらを上位のソフトウェアに通知する。

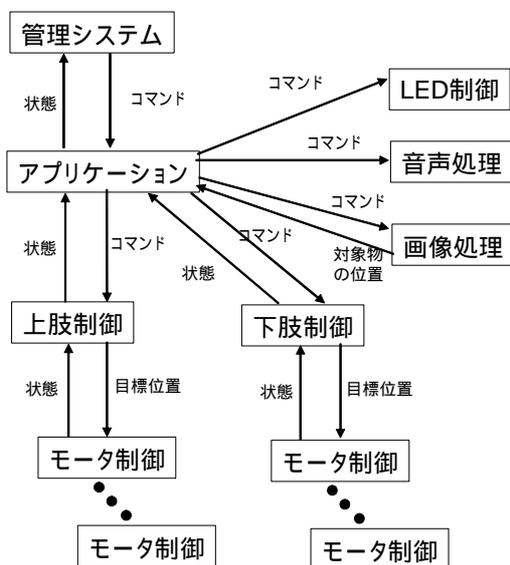


図4 ソフトウェアの構成図

4.2 下肢制御ソフトウェア

下肢制御ソフトウェアは、歩行の制御を行うソフトウェアである。具体的には、アプリケーションソフトウェアからの指令に基づき、歩行パターンを生成し、各モータコントローラに指令値を送信する。歩行パターンは線形倒立振り子モード^[1]を規範として生成することとした。また、下肢コントローラで実現されている歩行^[2]は、前進、後退、旋回、旋回歩行、サイドステップ、斜め移動である。さらに、キックとトラップ動作も実現されている。

4.3 上肢制御ソフトウェア

上肢制御ソフトウェアは、ジェスチャ動作等を制御するソフトウェアである。具体的には、アプリケーションソフトウェアからの指令に基づき、腰、腕、首、眼の運動を生成し、各モータコントローラに指令値を送信する。動作を直接的に与える（各関節の最終目標値、手先の最

終座標等）コマンドに加え、あらかじめ定めた動作パターン（バイバイ、お辞儀等）を実行するコマンドを付加し、様々なジャスチャによるパフォーマンスを容易に実現できるようにした。また、上肢動作の生成においても加減速を設定し、動作が振動的になることを抑制した。

4.4 画像処理ソフトウェア

画像処理ソフトウェアは、カメラから得られる画像を用いた状況認識を担当するソフトウェアである。具体的には、アプリケーションソフトウェアからの指令に基づき、対象物の位置を計測し、その情報をアプリケーションソフトウェアに送信する。対象物として、ボールの位置や予測経路、人の動作などを認識することが可能である^[3]。

4.5 音声処理ソフトウェア

音声処理ソフトウェアは、発話機能を担当するソフトウェアである。アプリケーションソフトウェアからの指令に基づき、音声合成処理を行う。処理結果はスピーカから出力される。発話機能の他に、歌唱機能、音楽再生機能を搭載しており、指令に基づきスピーカに出力することが可能である。

4.6 アプリケーション

アプリケーションソフトウェアは、ロボットの基本動作（例えば、ボールを探してそれを蹴る）を制御するソフトウェアである。具体的には、あらかじめ登録された基本動作に関する制御戦略に従って、上肢制御、下肢制御、LED制御、画像処理、音声処理の各ソフトウェアへの指令を生成する。また、各ソフトウェアから、実行結果に関するレポートを受け取り、ロボットの状態を管理システムへ通知する。

4.7 LED制御

アプリケーションソフトウェアの指令に基づき、あらかじめ設定したLEDの点灯パターンに従って、LEDの輝度制御を行う。

4.8 管理システム

管理システムは、ロボットに登録された基本動作を指定して、その実行に関して、トリガを与える、さらに、管理システムに繋がれたリモコンからの指令をアプリケーションソフトウェアに送信する機能を有する。また、アプリケーションソフトウェアからのロボットの状態を受信し、操作者に通知する。

5. 動作試験

製作したハードウェアを使用して、歩行およびキック動作に関して、動作実験を行った。図5に歩行開始時の様子を示す。図中の(a)～(d)は歩行開始時の1歩目の様子を、(d)～(f)は2歩目の様子を示している。図6にはキックの様子を示す。図中の(a)～(c)がキックの振り上げ動作の様子を、(d)～(f)が振り切り動作の様子を示している。

6. まとめ

本県では、産業振興施策の一環として、ロボット関連技術の県内企業への蓄積を図ることを目指している。この1つの手段として、愛知万博での展示を目的としたヒューマノイドロボット「ながら-3」を県内企業と協力して開発した。本研究では、開発仕様、ハードウェアおよびソフトウェアの概要について報告すると共に、動作試験の様子を紹介した。

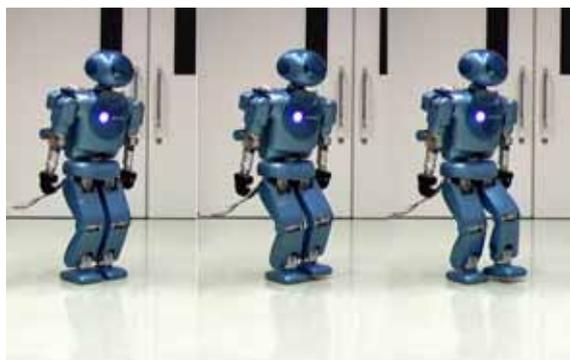
謝 辞

本研究は、NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）の「次世代ロボット実用化プロジェクト（プロトタイプ開発支援事業）」の採択を受けて開発した。

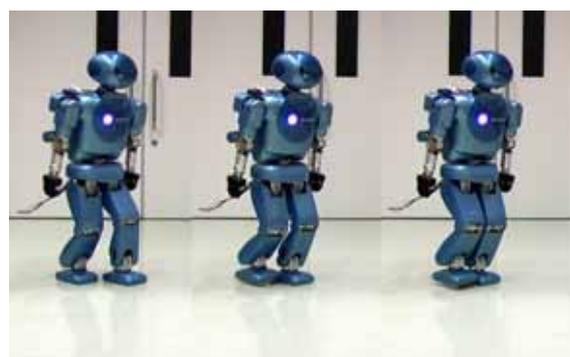
本研究は、(社)岐阜県工業会2足歩行ロボット試作特別研究会と共同で実施した。参加・協力企業各社に感謝する。

文 献

- [1] 梶田秀司“線形倒立振り子モードを規範とする動的2足歩行ロボットの実時間制御”機械技術研究所報告, 第171号
- [2] 久富茂樹, 光井輝彰, 稲葉昭夫, “「ながら-3」の歩行パターン生成に関する検討 - 万博出展ロボット「ながら-3」の開発 ”, 岐阜県生産情報技術研究所研究報告No 6, pp23-26, 2004
- [3] 小川宏, 稲葉昭夫, “移動物体の位置検出手法の検討 - 万博出展ロボット「ながら-3」の開発 ”, , 岐阜県生産情報技術研究所研究報告No 6, pp27.-28, 2004

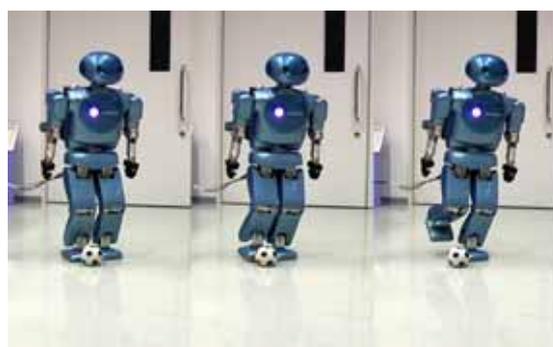


(a) (b) (c)



(d) (e) (f)

図5 歩行の様子



(a) (b) (c)



(d) (e) (f)

図6 キック動作の様子

「ながら - 3」の歩行パターン生成に関する検討

久富 茂樹 光井 輝彰 稲葉 昭夫

Walking Pattern Generation for Humanoid Robot 'NAGARA-3'

Shigeki KUDOMI Teruaki MITSUI Akio INABA

あらまし 福祉や介護といった民生分野で作業をするロボットは、これまでの産業用ロボットとは違い、人間と同じ空間で作業をしなくてはならない。人の生活環境を改造することなくそのままの状態でも自由に動き回るためには、ロボットの移動形態として二足歩行が適していると考えられる。安定した二足歩行の実現には歩行パターンの生成方法が重要な要素である。本年度は、「ながら - 3」の歩行パターンに三次元線形倒立振り子モードを採用し、さらに、歩行の最初と最後の運動について見直しを行った。シミュレーションと実機での歩行実験によって、より安定した歩行が実現できることを確認した。

キーワード ヒューマノイドロボット、2足歩行、線形倒立振り子

1. はじめに

福祉や介護といった民生分野で作業をするロボットは、これまでの産業用ロボットとは違い、人間と同じ空間で作業をしなくてはならない。人の生活環境を改造することなくそのままの状態でも自由に動き回るためには、ロボットの移動形態として二足歩行が適していると考えられる。安定した二足歩行の実現には歩行パターンの生成が非常に重要である。

二足歩行ロボットの歩行パターン生成に関しては、これまでいろいろな手法が提案されている^{[1]-[5]}。これらの多くはオフラインであらかじめ各関節の軌道を計算する手法である。しかし、ロボットが環境に適応して歩行したり、人の行動に対して歩行を伴ったリアクションを返したりするためには、実時間で歩行パターンを生成する必要がある。このような理由から、本研究では、制御則が単純で歩行パターンの実時間生成が可能な線形倒立振り子モード^[3]を規範とした手法を採用している^[6]。

これまでは、問題を簡単化するため、ロボットの運動を側面および正面から見た2次元平面（Sagittal Plane, Lateral Plane：図1）に投影した運動に分解し、Sagittal Planeの運動は倒立線形振り子モード、Lateral Planeの運動は倒立振り子の運動にそれぞれ基づいて歩行パターンを生成してきた。しかし、実際のロボットの歩行ではLateral Planeにおいてバランスを崩すことが多く見受けられ、パラメータのチューニングに多くの時間が必要であった。そこで、本年度は、Lateral Planeの運動にも線形倒立振り子モードを取り入れた三次元線形倒立振り子モード^[7]を「ながら - 3」の歩行パターンに導入した。また、歩行の最初と最後の運動について見直しを行い、より安定な歩行パターンの生成について報告する。

2. 三次元線形倒立振り子モードの導入

これまでの「ながら」の歩行パターンは、ロボットの運動を側面および正面から見た2次元平面（Sagittal Plane, Lateral Plane）に投影した運動に分解し、それぞれの平面で定義した運動を基に生成してきた^[6]。Sagittal Planeの運動に関しては、線形倒立振り子モードを規範とすることで、ZMPが支持脚足首位置となる歩行パターンを生成していた。一方、Lateral Planeの運動に関しては両足の中間を支点とする倒立振り子の運動に基づいていたため、ZMPが支持脚足裏内に納まることを保証しているわけではなかった。そのため、Lateral Planeにおいて歩行中にバランスを崩すことが多く見受けられ、試行錯誤で決定するパラメータ調整に多くの時間を要していた。

そこで、本研究では梶田が提案している三次元線形倒立振り子モード（3D-LIPM）^[7]を導入することでパラメータ調整に頼ることのない歩行パターン生成を試みる。3D-LIPMでは、重心を唯一の質点としたモデルに対し、Sagittal Plane, Lateral Planeの運動は、それぞれ式(1)、式

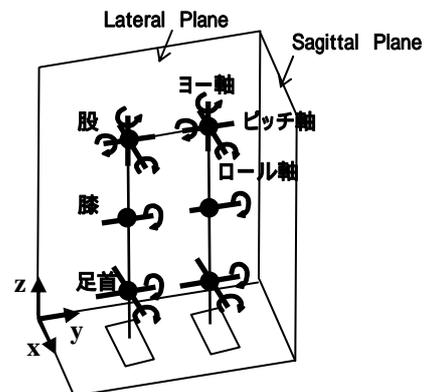


図1 ロボットの脚関節自由度

(2)で表すことができる．

$$\ddot{x} = \frac{g}{z_c} x \dots \dots \dots (1)$$

$$\ddot{y} = \frac{g}{z_c} y \dots \dots \dots (2)$$

ただし, z_c : 重心高さ, g : 重力加速度で, 歩行中の腰の高さは一定である．

式(1)の解析解は次のようになる．

$$x = X_0 \cosh\left(\frac{t}{T_c}\right) + T_c V_{0x} \sinh\left(\frac{t}{T_c}\right) \dots \dots \dots (3)$$

ここで, $T_c \equiv \sqrt{z_c/g}$ であり, X_0, V_{0x} は, 前後のパターンの歩幅と時間によって決定される初期位置, 初期速度である．

また, 同様に式(2)の解析解は次のようになる．

$$y = Y_0 \cosh\left(\frac{t}{T_c}\right) + T_c V_{0y} \sinh\left(\frac{t}{T_c}\right) \dots \dots \dots (4)$$

図2のような座標系を考えると, 右足支持の場合,

$$\begin{cases} Y_0 = s \\ V_{0y} = -V_{\max} \end{cases} \dots \dots \dots (5)$$

左足支持の場合,

$$\begin{cases} Y_0 = -s \\ V_{0y} = V_{\max} \end{cases} \dots \dots \dots (6)$$

ただし,

$$V_{\max} = \frac{s}{T_c} \cdot \frac{\cosh\left(\frac{T_s}{T_c}\right) - 1}{\sinh\left(\frac{T_s}{T_c}\right)} \dots \dots \dots (7)$$

$$\alpha = \cosh\left(\frac{T_s}{2T_c}\right) - \frac{T_c V_{\max}}{s} \sinh\left(\frac{T_s}{2T_c}\right) \dots \dots \dots (8)$$

s : 両足の間隔の1/2である．

式(3), 式(4)と, 次の拘束条件から, 逆運動学を解いて, 各関節の角度を求める．

< 拘束条件 >

- ・ 常に上体の姿勢が一定になるようにする．
- ・ 足裏が常に地面と平行になるようにする．

3．最初と最後の歩行パターン

両足支持の静止状態から最初の一步の運動をするときには, 重心を支持脚に移動させてから遊脚の運動を開始しないとバランスを崩してしまうことがこれまでの研究からわかっている．「ながら - 3」の歩行パターンにお

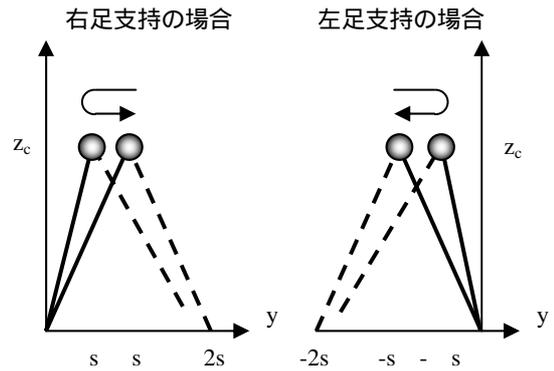


図2 Lateral Plane での運動

いても, 最初の一步について, 腰の運動の遅れと遊脚の運動の遅れをそれぞれ独立に設定できるようにする．

また, Lateral Planeでの線形倒立振子モードでは, 重心が体の中心線を通るとき速度最大となり, 最大振幅のとき速度が0になる．したがって, 重心が体の中心線的位置(中立位置)で, 両足を着床させ停止しようとするとき, 大きな加速度を発生させることになり, 停止が不安定になる．そこで, 歩行の停止時は, Lateral Planeでの腰振幅が最大の位置で両足を着床させ, ZMPの許容範囲が広い両足支持の状態まで運動する歩行パターンとする．この運動は, 停止時の速度および加速度がゼロとなる境界条件を満たす4次関数で与える．

4．シミュレーション

まず, 「ながら - 3」の形状データ, 質量データから, 三次元CAD (Solid Works) を用いて, モデルの作成を行った．このモデルを用いて, 機構解析ソフトウェア (COSMOS MOTION) により, 歩行シミュレーションを行った．足裏と地面との間に接触条件を定義し, 各関節に強制変位を与えることで歩行を行った．

まず, 2章で述べたように三次元線形倒立振子モード

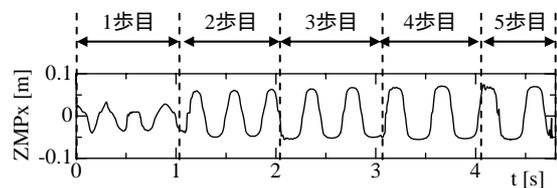


図3 Sagittal PlaneでのZMP (シミュレーション)

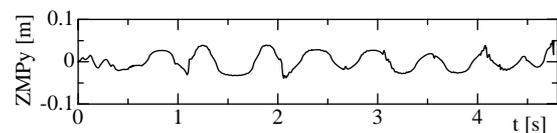


図4 Lateral PlaneでのZMP (シミュレーション)

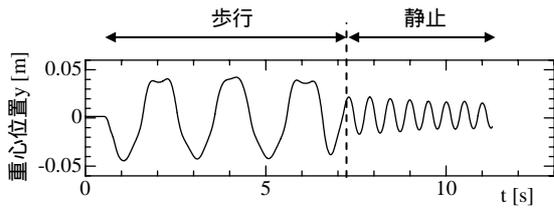


図5 改良前の歩行パターンでの重心位置

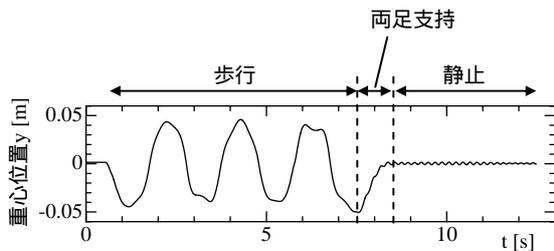


図6 改良後の歩行パターンでの重心位置

を用いて歩行パターンを作成した。5歩の歩行シミュレーションを行ったときのSagittal PlaneでのZMPを図3に、Lateral PlaneでのZMPを図4にそれぞれ示す。ZMPは足裏（長さ：0.15[m]，幅：0.10[mm]）内にほぼおさまっており，転倒することなく歩行することができた。三次元線形倒立振り子モードを用いることで，パラメータを調整することなく，安定した歩行パターンの作成が可能になった。

次に3章で述べた最初と最後の歩行パターンを用いてシミュレーションを行った。7歩目で停止した後，そのままの関節角度を4秒間保持して，ゆれの状態を確認した。図5に改良前の歩行パターンでの重心位置（lateral Plane）を示す。また，図6に改良後の歩行パターンでの重心位置を示す。ただし，中立位置を原点としている。改良後のパターンでは，停止後のゆれが小さく，より安定に停止することができた。

5. 実機での歩行実験

実験では3章で述べた歩行パターンを用いてロボットを前進させ，その際に6軸力センサ（ピーエルCentimセンサ）で計測した左右の足首の力情報を基にZMPの計算を行った^[9]。図7に歩行実験の様子を示す。なお，実験では電源は外部電源を使用（ロボット全重量約20kg）し，歩行コマンドの入力は外部のPCから行った。歩行条件は以下の通りである。

- ・歩幅：0.15[m]
- ・遊脚足上げ高さ：0.03[m]
- ・左右足間隔（2S）：0.125[m]
- ・一步の時間（最初と最後以外の一步）：1[s]
- ・歩数：7[歩]

実験結果として，歩行パターンにおける支持脚中心の軌跡（理想値）と実測したZMPの軌跡について，スタート時の支持脚中心を基準としたSagittal Planeにおける位置（x）を図8に，両足の中心を基準としたLateral Planeにおける位置（y）を図9にそれぞれ示す。歩行の一步目を見ると，前半の両足支持期に両足の中心にあったZMPが，支持脚の左足下にスムーズに移行していることが確認できる。一方，最終歩の歩行を見ると支持脚の左足下にあったZMPが，遊脚の右足が着床して両足支持期に移行した際にSagittal Plane，Lateral Plane共に揺れており，シミュレーションほどの効果は確認できなかった。それ以外の2歩目以降最終歩までは，ZMPは支持脚の足裏内にほぼおさまっており，その軌跡からおおむねパターン通りに支持脚が切り替わり安定して歩行が行われたことが推測される。ただし，計測結果を詳しく見ると左足の着床が若干早く，特に4歩目の着床後の支持脚の切り替えにおいて乱れを確認することができる。この乱れは本実験の範囲内ではロボットがバランスを失うほどのレベルではなかったが，ロボットの動作条件によっては転倒につながる危険性がある。こういった乱れを補正し歩行を安定化することは今後の課題である。

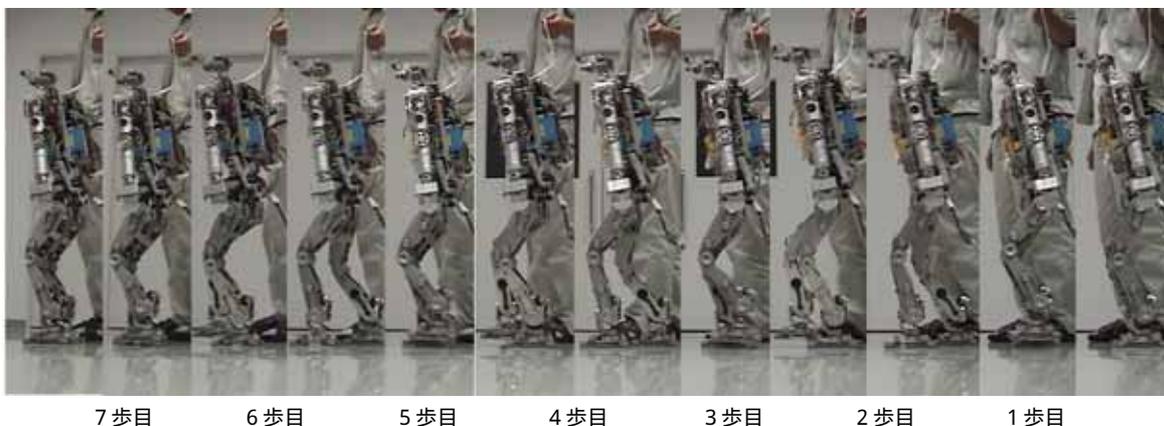


図7 歩行実験の様子（7歩前進）

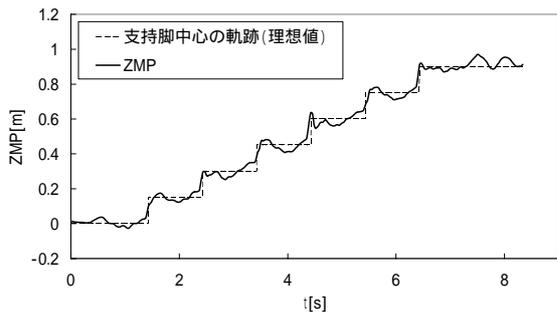


図8 Sagittal PlaneでのZMP (実機)

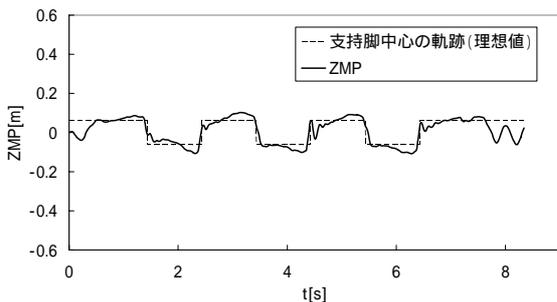


図9 Lateral PlaneでのZMP (実機)

6. まとめ

「ながら-3」の歩行パターン生成に三次元線形倒立振子モードを採用した。さらに、歩行の最初と最後の運動について見直しを行った。シミュレーションと実機での歩行実験によって、より安定した歩行が実現できることを確認した。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、多くの有益な助言をいただいた川崎重工株式会社 久司一博氏に深く感謝する。

文 献

- [1] 山口仁一, 高西淳夫, 加藤一郎 “ 上体運動により3軸モーメントを補償する2足歩行ロボットの開発”, 本ロボット学会誌, Vol.11, No.4, pp.581-586, 1993
- [2] 西脇光一, 北川知伸, 杉原知道, 加賀美聡, 稲葉雅幸, 井上博允, “ ZMP導出の線形・非干渉化, 離散化によるヒューマノイドの動力学安定軌道的高速生成”, 第18回ロボット学会学術講演会予稿集, pp.721-722, 2000
- [3] 梶田秀司 “ 線形倒立振子モードを規範とする動的2足歩行ロボットの長時間制御”, 機械技術研究所報告, 第171号
- [4] 遠藤謙, 山崎文敬, 北野宏明, 前野隆司, “ 進化的計

算法を用いた2足歩行ロボットの形態と歩行パターンの生成”, 第19回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.519-520, 2001

- [5] Jiang Shan, Fumio Nagashima, “Biologically Inspired Spinal locomotion Controller for Humanoid Robot”, 第19回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.517-518, 2001
- [6] 稲葉昭夫, 光井輝彰, 西村太志, 千原健司, 田中等幸 “ ヒューマノイドロボット基本ハードウェアの開発”, 岐阜県生産情報技術研究所報告No3, pp.1-8, 2002
- [7] Shuuji Kajita, Osamu Matsumoto, Muneharu Saigo “ Real-time 3D walking pattern generation for a biped robot with telescopic legs”, Proc. of the 2001 IEEE International Conf. on Robotics & Automation, pp.2299-2306, 2001
- [8] 千原健司, 稲葉昭夫, 光井輝彰, 小川行宏 “ ヒューマノイドロボット「ながら」の歩行技術に関する改良”, 岐阜県生産情報技術研究所報告No4, pp.7-10, 2003
- [9] 李清華, 高西淳夫, 加藤一郎 “ 6軸力センサを用いた2足歩行ロボットのZMP測定システムの開発”, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.6, pp.828-833, 1992

移動物体の位置検出手法の検討

小川 行宏 稲葉 昭夫

Examination of Positional Detection Technique of Movement Object

Yukihiro OGAWA Akio INABA

あらまし 本報告では、ロボット本体が振幅する中で、ロボットに搭載されたカメラの画像情報を利用して、動いている対象物の位置や動きを取得するための技術の開発を目的とする。ステレオカメラを用い三次元座標として扱うことにより、処理を高速化し、位置を検出する手法を検討する。本手法を用いることにより、高速に対象物の位置を得ることが可能となった。また、転がるボールの動作予測を行い、ボールの軌跡を予測可能であることがわかった。

キーワード ヒューマノイドロボット、位置検出

1. はじめに

本報告では、ロボット本体が振幅する中で、ロボットに搭載されたカメラの画像情報を利用して、動いている対象物の位置や動きを取得するための技術の開発を目的とする。カメラ座標系と対象物の位置関係を画像情報等により把握する技術は、これまで多くの手法が提案されている^[1,2,3]。これらの手法は、1つのカメラと指標を使用してカメラと指標の位置関係を求めるものであり、途中に繰り返し演算が行われたり、複雑な画像の処理を行っていたりするため、ロボットに組み込んで高速検出することは困難である。

そこで本報告ではステレオカメラを用い三次元座標として扱うことにより、処理を高速化し、位置を検出する手法を検討する。

2. 位置検出手法

2.1 システム構成

ロボットと対象物の位置関係を画像情報等により把握するためには、単にカメラと対象物の相対位置関係を取得するだけでは不十分であり、下記の5つの情報を検出する必要がある。

- カメラと対象物の相対位置
- カメラのグローバル座標位置
- 対象物のグローバル座標位置
- 対象物の動作予測経路
- カメラ座標系とロボット座標系の関係

特に、対象物を検出する中で問題となるのは、ロボットが動いているために、ロボットのカメラの座標系とフィールド上のグローバル座標系の関係が常に変化するこ

とにある。ロボットが確実に動作できれば、初期位置からロボットがどのように動作したかにより、求めることが可能となるが、現実的にはロボット動作には誤差があり難しい。そこで本報告では、フィールド内に複数の指標を設置し、指標と対象物の位置情報を同時に認識することにより、上記 から の情報を検出する。また、フィールド上での対象物の位置がリアルタイムで検出することが可能であれば、その情報を利用して対象物の動作予測経路を検出する。

2.2 位置検出手法

まず、二つのカメラ画像から、色抽出処理、ラベリング処理により、対象物と複数の指標の画像情報を同時に取得する。図1に画像処理の様子を示す。取得した各画像座標情報を用い各点のカメラ座標系における三次元位置を計算することにより、ロボットと対象物の相対位置()及びロボットと指標の相対位置を求める。この時、左右画像における3つの指標の対応について、指標の位置関係により対応付けを行っている。

次にロボットと指標の相対位置からロボットのグロー

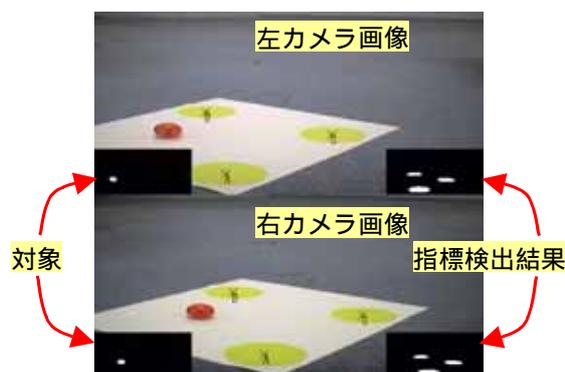


図1 画像処理結果

バル座標位置()を求める。本報告では、グローバル座標位置が既知の3つの指標を床に置くことにより位置関係を計算する。指標のグローバル座標位置とカメラ座標位置が求まっているため、座標系の変換行列を計算することができる。この変換行列から、ロボットのグローバル座標位置()を求める。指標が必ずしも、同一画面に入らない場合には、複数の指標の切り替えることにより対応可能である。複数の指標の区別には異なる色情報を利用することにより実現する。変換行列と対象物のカメラ座標における位置()により、対象物のグローバル座標位置()を求めることが可能となる。

リアルタイムに対象物のグローバル座標位置を取得できれば、時系列データを用いて、対象物の動作予測を行うことが可能である。本報告では、ロボットに向かって転がるボールを対象として、動作経路の予測()を行った。時系列の位置データから、最小二乗法を用いて、ボールの到達点を予測する。

本手法を用いることにより、ロボットが揺れ動いている場合でも、対象物のグローバル座標位置を検出することが可能となる。

3. 実験

3.1 システム構成

図2に実験システム構成を示す。ステレオカメラと画像処理ユニット(NVP-930N,ルネサス北日本セミコンダクタ製)を用いる。また、フィールドには指標として円形のプレートを用いる。また、対象物としてボールを設置する。また、ステレオカメラの画像内に指標と対象物が入るような状況を想定する。

3.2 動作予測に関する実験

動作予測に関する検証実験を行った。ロボットが停止した状態で、向かってくるボールに対して、ロボットの右側の到達地点を計算した結果を図3に示す。横軸は経過時間である。時間が4681msec以前はボールが停止しているため、動作予測値は誤ったものとなっている。それ以降は、予測値が収束して、対象物の動作を予測することが可能となった。

4. まとめ

ステレオカメラと指標を用いることにより、対象物の三次元位置を取得する手法について検討した。実験により、ある程度の精度で三次元位置が得られた。また、動作の予測として、ボールの軌跡を予測可能であることがわかった。今後の課題として、ステレオ視の性質上、対象物の距離が遠いほど精度が落ちるため、距離が遠いところではある程度の方向の予測にとどめておき、距離が近くなった時に正確な予測値を求めるような、段階的に

予測を変更するような手法を検討する必要がある。また、動作予測値に基づいて、ロボットが動作する実験を行う必要がある。今回、対象物の3次元情報を取得する手段を確立したことから、今後、ボール以外の動作予測の可能性について検討の余地がある。また、ロボットが広範囲移動した場合の指標の配置手法や、選択手法について考慮することが挙げられる。

文献

- [1] 出口光一郎,多田羅哲夫,“画像合成のための高速・簡易カメラキャリブレーション”,計測自動制御学会論文集,Vol.31,No.8,pp.1015-1022,1995
- [2] 高橋章,石井郁夫,牧野秀夫,中静真,“人工現実感インターフェースのための嘆願画像からのマーカー位置と姿勢の計測”,電子情報通信学会論文誌,Vol.J79-A,No.3, pp.804-812,1996
- [3] 加藤博一,Mark Billinghamurst,浅野浩一,橋啓八郎,“マーカー追跡に基づく拡張現実感システムとそのキャリブレーション”,日本バーチャルリアリティー学会論文誌,Vol.4,No.4,1999

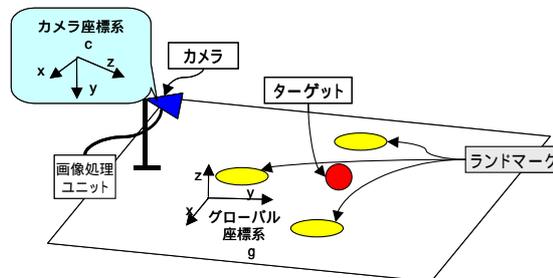


図2 システム構成

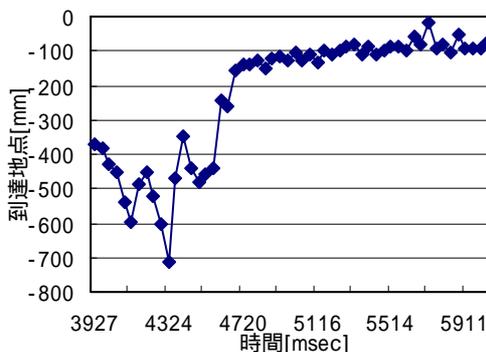


図3 ボールの到達点検出結果

人の動作模倣手法の検討

～インタラクションに基づく親和性向上に関する研究～

小川 行宏 田中 泰斗 山本 和彦* 張 勤 稲葉 昭夫

Study on Motion Emulation Technique for Humanoid Robot

- Improving Human Friendly Interface based on Interaction with Robot -

Yukihiro OGAWA Taito TANAKA Kazuhiko YAMAMOTO* Qin ZHANG Akio INABA

あらまし 本研究では、ロボットが人の動きを模倣することにより、動作を獲得する手法について検討する。主にロボットに搭載したカメラから入力された画像を用いて人の動作を検出する手法について述べる。また、動作シミュレータを用いて、ロボットの動作を確認する。動作の検討の結果、ほぼ実時間で動作し、人の動作に近い動作の模倣が可能であることがわかった。

キーワード ヒューマノイドロボット、動作の模倣

1. はじめに

これまでのロボットは主として産業用ロボットに見られるように、人の代わりに重労働や過酷な環境での作業に用いられ、生産の高度化、効率化、省力化のために活用されてきた。しかし、今後は、ロボットがさまざまな形で人間社会に関わり、人の日常生活を支援することが想定されており、特に家庭内で使用するロボットが注目されている。

現在、人の日常生活を支援するロボットの研究は幅広く、多方面で行われている^[1,2,3]。人の作業を直接的に支援するものとして、荷物を運ぶ軽搬送作業をするものや家電操作するものなどがある。また、間接的に支援するものとして、人とコミュニケーションをするペットロボットや、ロボットの表情や身振りを交えてコミュニケーションを行うロボット、もの真似を行うロボットなどの開発例がある。さらに、留守番ロボットなど人のいないところで代理作業するものも存在する。このようなロボットは人間と接しながら活動するため、人間がロボットに対して親しみをもつことや、人間とロボットが円滑にコミュニケーションを行うことが重要であり、これらの要素技術の開発が望まれている。

一方、人間が親しみを持つロボットとして、人型ロボット（ヒューマノイドロボット）が注目されており、特に日本においては、人と同じ型を持つロボットに対して、親近感や好意持つ人が多い。

しかしながら、ヒューマノイドロボットは、非常に多くの関節から構成されており、無数に存在する動作の中から自然な動きを抽出し、ロボットに再現させるためには多大な労力を要する。

そこで、ロボットに人の動きを模倣させることに着目する。すなわち、ロボットが人の模倣から動作を獲得することにより、複雑な動作設定を行う事なく自然な動作を実現することが可能になると考えられ、ロボットが人と同じように身振りを交えて動作することで、円滑なコミュニケーションが実現できるものとする。また、ロボットが、人とかかわりの中で、自然に動作を獲得することにより、さらに親近感を得られるのではないかと考える。

本研究では、ロボットが人の動きを模倣することにより、動作を獲得する手法について検討する。主にロボットに搭載したカメラから入力された画像を用いて人の動作を検出する手法について検討するとともに、動作シミュレータを用いて、ロボットの動作を確認する。なお、ロボットのプラットフォームとしては、ヒューマノイドロボット「ながら-3」(図1)を想定している。



図1 ヒューマノイドロボット「ながら-3」

* 岐阜大学 工学部 応用情報学科

2. 動作の模倣

2.1 動作の模倣について

本研究では、ロボットがあらかじめ設定された動きだけを行うのではなく、人とかかわりの中で、自然に動作を獲得することを目的とする。

そのため、完全な動作の再現を目的とするのではなく、ある程度人の動作に近い動作をすることを対象とする。また、人とかかわりの中で動作を獲得するために、人にできる限り負荷の少ない手法を検討する。

2.2 ロボットの動作

人間は非常に多くの関節を持ち、その関節は柔軟であるため、ヒューマノイドロボットの持つ自由度で人間の動作を完全に模倣することは不可能である。従って、ロボットの限られた自由度のなかで、人の動作に近い動作を再現することとなる。

使用するアームは手先を除いて5自由度であり、手先の位置・姿勢を制御するためには自由度が不足するため、入力としては手先目標位置のみを扱うこととする。目標となる手先位置と順運動学モデルにより得られる手先の位置を比較し、それぞれの誤差をフィードバックする。そして、それらを逆ヤコビ行列により各関節軸の駆動速度に変換し、これらの値を積分して各関節軸の角度を得ている。また、ここで得られた角度は順運動学モデルへの次入力となっている。このループは誤差が決められた閾値を下回るまたは角度の計算回数が既定回数を超えるまで繰り返される。

この手法を用いることにより、手先の位置を実現する各関節の角度を求めることができる。

2.3 人の動作の検出及びロボットへの動作適用

人の動作を検出する手法として、人体の各部にセンサを装着する手法^[4]や、マーカーを装着する方法^[5]があるが、動作を取り込むたびに体中にセンサやマーカーを取り付けなければならないため、人に対する負担が大きい。

これに対して、画像を用いて動作を取り込む手法は、カメラの前で動くだけで動作を取り込むことができるため、人に対する負担が少なく、ロボットと人のかかわりの中で動作を獲得することが可能となる。画像を用いて動作を取り込む方法としては、複数台のカメラを用いる手法^[6,7,8]や、1台のカメラのみを用いる手法^[9,10,11]などが報告されている。

本研究では、ロボットの目の位置に搭載した二つのカメラから得られる画像を用いて動作の検出を行う。画像から、両手先・顔の三次元位置を検出することにより、ロボットへの動作指令値を生成する。また、人とロボットの大きさが異なるため、検出した人の動作を、ロボットの動作に適用するためには、サイズの正規化等が必要となる。本研究では、両手先・顔の相対位置関係から、ロボットのサイズへ規格化することとする。

3. 動作検出手法

3.1 概要

ロボットの目の位置に搭載した二つのカメラの画像から人の動作を検出するために、四方向面特徴^[12]を用いたテンプレートマッチング^[13]及びステレオ視による位置計測を利用する。この他にも、顔領域の検出に色情報を用いる手法があるが、照明条件・背景・顔以外の部分等の環境変化等に影響を受けやすいため、本研究ではテンプレートマッチングを使用する。

動作検出のフローチャートを図2に示す。動作の検出を行う前処理として、カメラキャリブレーションと顔・手先検出用のテンプレート作成を行う。入力された画像から、四方向面特徴テンプレートマッチングにより顔・両手先の検出を行う。マッチングに四方向面特徴を用いることにより、位置のわずかなずれが特徴量に及ぼす影響が少なくなり、ロバストに検出可能である。画像上での顔・両手先の位置が検出できれば、視差による距離計測を行い、顔と手先の相対位置関係を計算する。ロボットのサイズへ正規化することによりロボットへの動作指示が可能となる。各項目については、次節以降で詳細を述べる。

3.2 前処理(キャリブレーション)

二つのカメラからの画像を使用したステレオ視による位置計測を行うために、カメラキャリブレーションを行う必要がある。キャリブレーションボードを用いて、カメラの内部パラメータと外部パラメータを求める。

3.3 前処理(テンプレートの作成)

顔・手先検出用のテンプレートを作成する。テンプレートの作成にはあらかじめ撮影した画像を用いる。入力画像ごとに、顔・両手先の位置を指定し、そこから四方向面特徴を抽出する。各画像から抽出した四方向面特徴

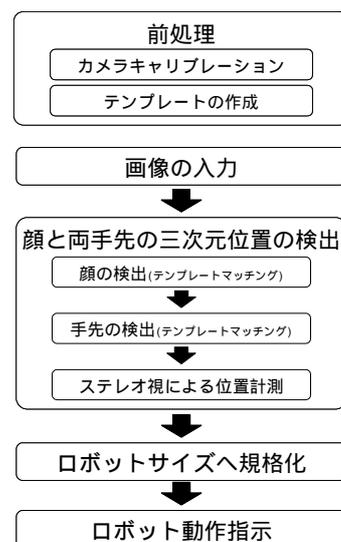


図2 動作検出のフローチャート

を蓄積し、平均化したものをテンプレートとして使用する。平均化することにより、よりロバストな検出が可能となる。

テンプレートは、顔テンプレートと手先テンプレートの2つを作成すればよい。しかしながら、予備実験において、手の形状が異なる場合に精度が落ちることがわかった。そのため、本手法では、複数の手の形状について別々にテンプレートを持つことにより検出精度を向上させる。ただし、多くのテンプレートを使用すると、マッチング回数が増加し、処理速度が低下するため、右手・左手の手を閉じた状態と開いた状態の4つのテンプレートを準備することとした。

3.4 顔の検出

図3に顔の検出のフローチャートを示す。

まず、左カメラ画像から垂直・水平・右上がり・右下がりの4方向のエッジ特徴画像を抽出する。抽出した特徴にガウシアンフィルタを使用してぼかし処理を行った後、特徴画像のサイズを変更する。各サイズの特徴画像に対して、テンプレートマッチングを行い、最も相関値の高いところを、左カメラ画像における顔の検出位置とする。

次に右カメラ画像から、顔の位置を検出する。各サイズの画像に対してテンプレートマッチングを行うのではなく、左カメラ画像において顔を検出したサイズに変更する。次に、左カメラ画像において、顔を検出した位置の特徴画像をテンプレートとして使用して、テンプレートマッチングを行う。また、マッチング範囲を左カメラ画像の位置から計算して、範囲を限定してマッチングを行う。右カメラ画像において複数のサイズの画像に対してマッチングを行わないことや、マッチング範囲を限定することで、処理の高速化を図っている。

3.5 手先の検出

右手・左手先の検出は、顔の検出とほぼ同じ手順で行う。ただし、3.3節で述べたとおり、手先の検出には4種類のテンプレート(片手で2種類)を使用する。そこで、両方のテンプレートを使用してマッチングした後、相関値の高い方を検出位置とした。また、顔の位置検出結果を利用して、右手先は段階的なテンプレートマッチング手法を用いたことにより、カメラと人の距離が変更しても、検出可能であることが判る。また、手先のテンプレートの種類を複数持つことにより、手の形状が変化した場合にも対応できていることが判る。顔の位置よりも右、



図4 顔・手先の検出結果

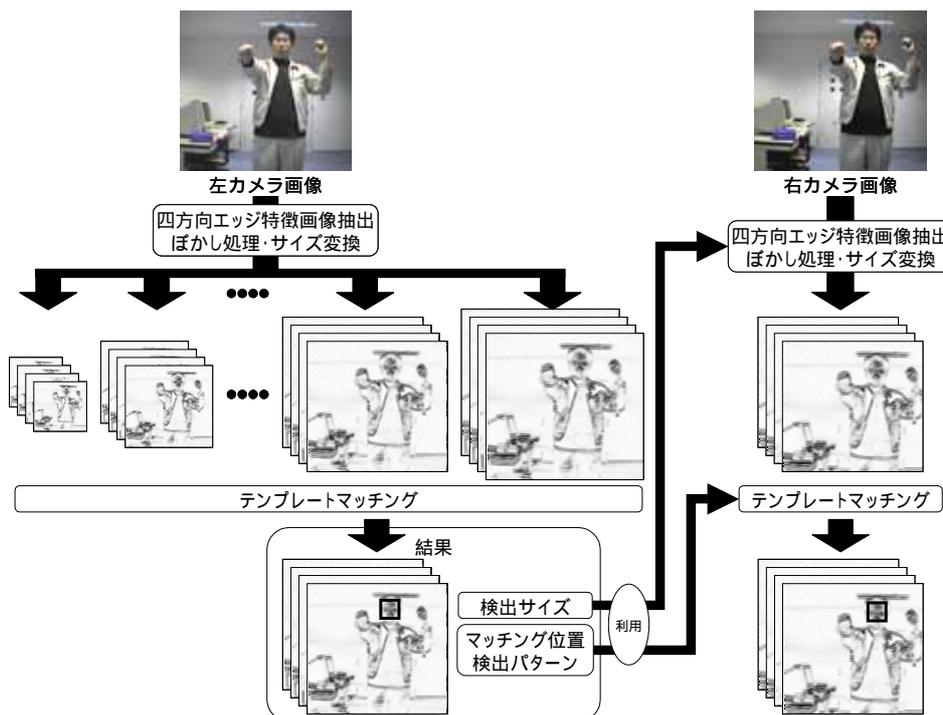


図3 テンプレートマッチングのフローチャート

左手先は顔の位置よりも左と手先の検索範囲を絞り込むことにより高速化を図っている。

図4に顔と両手先の検出結果の一例を示す。白い矩形で囲んだところが顔、黒い矩形が手先の検出位置である。

3.6 ステレオ視による位置計測

顔・手先の画像上での位置を検出できれば、前処理において求めたカメラパラメータを用いることで、カメラ座標系からの距離を計算できる。

3.7 サイズの規格化

検出した顔・手先の位置関係は、人の大きさであり、そのままの情報ではロボットの動作指令値とすることはできない。本研究では、システムの簡略化のために、ロボットが直立し、人と向かい合っているものと仮定する。また、首のピッチ軸(仰角)のみを使用して人の検出を行うものとする。

人の腕の長さ、肩幅、肩の高さから顔の中心までの距離と、ロボットのリンクパラメータを使用することにより、人の検出サイズとロボットのサイズの規格化を行う。

4. ながら-3動作シミュレータ

本研究では、「ながら-3」の動作シミュレータを作成し、この動作シミュレータを用いて、システムの検証を行う。

図5にシミュレータの画面を示す。動作シミュレータは、手先の位置や、視点位置などの入力に対して、逆運動学の解を求め、得られた解を元にロボットの上半身の動きを動画として表現するものである。また、「ながら-3」に搭載されている画像処理ユニットと接続することで、画像処理した結果に基づいて、動作することが可能である。本研究では、その中の、手先の位置を指示する機能と画像処理ユニットとの通信機能を使用して、動作模倣システムの検証を行う。なお、シミュレータでは、「ながら-3」実機の関節可動範囲およびリンク長を使用している。また、手先位置制御においては、目標位置が常にアームの可到達領域内に収まるよう前処理を行って

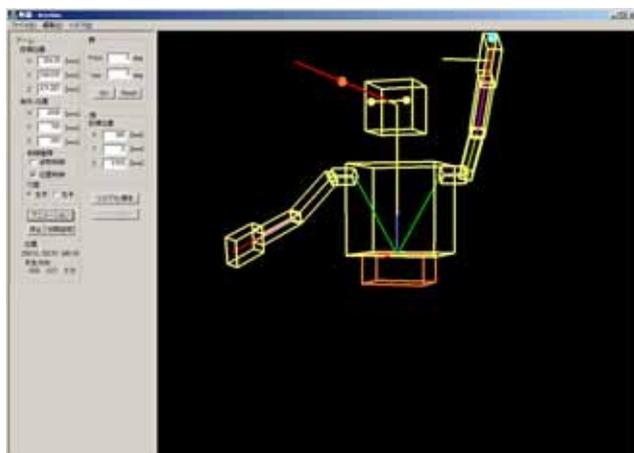


図5 動作シミュレータの画面

いる。さらに、逆運動学の解を求める際は、アームの冗長性を利用し各関節角度ができる限り可動範囲内に収まるように計算処理を行っている。

5. 実験

5.1 実験手法

本研究で提案した動作検出手法及びロボット動作手法について実験を行う。動作検出手法を「ながら-3」に搭載されている画像処理ユニット(NVP-935N)に実装した。また、画像処理ユニットと動作シミュレータを接続し、動作検出の結果を用いてシミュレータが動作させて実験を行った。

5.2 動作検出速度

動作検出は、人の動作速度に追従する必要がある。そのため本研究で提案した動作検出手法について処理速度を測定した。結果を表1に示す。動作の検出は約10fps(fps:フレーム/秒)であり、ある程度の動きには追従可能である。

表1 処理速度結果

	速度
未検出時	約15(fps)
顔のみ検出時	約11(fps)
手先の検出時	約10(fps)

5.3 シミュレータによる実験

動作シミュレータを使用して、実験を行った。実験結果の一例を図6に示す。左から順に、動作検出結果(左カメラ画像,右カメラ画像),シミュレータの結果と並んでいる。シミュレータの動作結果は正面から見た場合と、左前方から見た場合の2種類表示した。動作の検出を正確に行うことができた場合は、ロボットの動作は人の動作に近い形になっていることが確認できた。

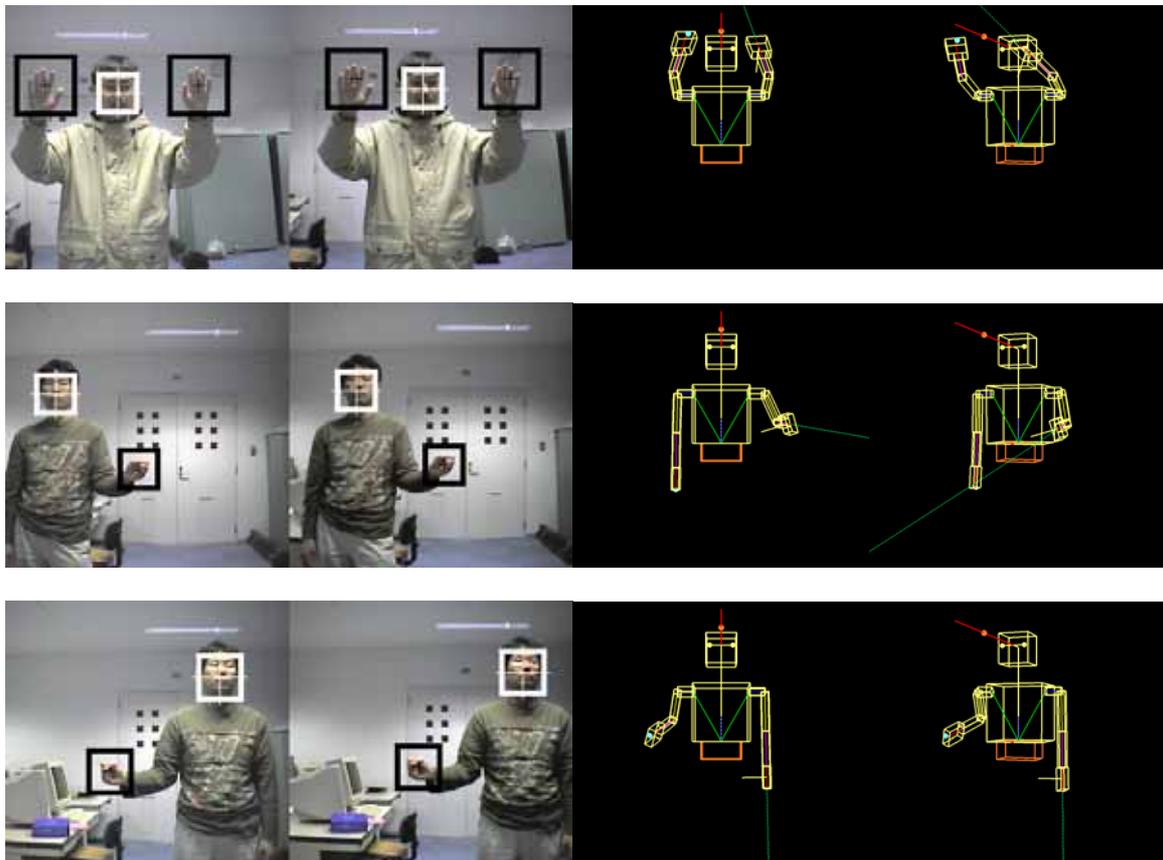
ただし、顔の検出精度に比べて手先の位置の検出精度が低く、不自然な動きをする場合が見受けられた。これは、手の形状変化が大きいことや、顔に比べて手のテクスチャ情報が少ないためであると推測される。ロボットに実装するためには、手先検出精度の向上を図る必要がある。また、アームと胴体、頭などの干渉対策を講じる必要もある。

6. まとめ

本研究では、ロボットが人の動きを模倣することにより動作を獲得するため、ロボットに搭載したカメラから入力された画像を用いて人の動作を検出する手法を提案した。また、動作シミュレータを用いて、ロボットの動作検討を行った。ロボットの動作は、ほぼ実時間で動作し、人の動作に近い動作の模倣が可能であることがわかった。

文 献

- [1] 神田,石黒,小野,今井,前田,中津, “ 研究用プラットフォームとしての日常活動型ロボット ” Robovie ” の開発”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J85-D- , No.4, pp.380-389, 2002
- [2] 藤田, ” パーソナルロボットR100 ” , 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.2, pp.40-41, 2000
- [3] 藤田, ” Robot Entertainment System AIBOの開発”, 情報処理, Vol.41 , No.2, pp.146-150, 2002
- [4] 吉村,酒井,甲斐,吉村, ” 日本舞踊の「振り」部分抽出とその特性の定量化の試み ” , 信学論, Vol. J84-D No.12, pp.2644-2653, 2001.
- [5] Motion Analysis, Eva 5.20 Reference Manual, 1999.
- [6] S.Drouin, R.Poulin, P.Hebert, and M.Parizeau, “ Monitoring Human Activities: Flexible Calibration of a Wide Area System of Synchronized Cameras ” , Proc. of 16th ICVI, pp.49-56, 2003.
- [7] 森,内海,大谷,谷内田, “ 非同期多視点画像による人物追跡システムの構築 ” , 信学論, Vol. J84-D No.1, pp.102-110, 2001.
- [8] S.Drouin, R.Poulin, P.Hebert, and M.Parizeau, “ Monitoring Human Activities: Flexible Calibration of a Wide Area System of Synchronized Cameras ” , Proc. of 16th ICVI, pp.49-56, 2003.
- [9] J.Vignola, J.F.Lalonde, and R.Bergevin, “ Progressive Human Skeleton Fitting ” , Proc. of 16th ICVI, pp.35-42, 2003.
- [10] C.J.Park, S.E.Kim, R.H.Lee, and I.H.Lee, “ Real-Time Marker-free Motion Capture System Using Blob Feature Analysis and Inverse Kinematics ” , Proc. of FCV 2003, pp.167-173, 2003.
- [11] S.M. Baek, K.J. Park, C.J. Park, and I.H. Lee, “ A Single Camera-based On-Line Avatar Control System ” , Proc. of VSMM 2003, pp.310-317, 2002.
- [12] K. Yamamoto, "Present State of Recognition Method on Consideration of Neighbor Points and Its Ability in Common Database", *IECE Transactions*, Vol.E79-D, No.5, pp.417-422, 1996.
- [13] 本郷, 安本, 丹羽, 山本: “ 適応的判別空間生成による顔認識手法の提案 ” , 信学技報 , PRMU2001-121 , 2001 .



左から順に, 画像処理結果(左カメラ画像, 右カメラ画像), シミュレータの結果(正面, 右前方)

図6 実験結果の一例

情報収集(被災者捜索)ロボットの移動機構に関する研究-第3報-

田畑 克彦 稲葉 昭夫 今井 智彦 天野 久徳* 鈴木 隆司*

Development of Mobile Robot to Gather Information for Relief Activities -3rd report-

Katsuhiko TABATA Akio INABA Tomohiko IMAI Hisanori AMANO* Takashi SUZUKI*

あらまし 大震災等の大規模災害後の救助活動において、被災者やその周囲の情報を収集する情報収集ロボットの活躍が期待されている。これらのロボットの情報収集範囲は、一般的に移動システムの移動能力に依存するため、情報収集ロボットはガレキ上を移動でき、ガレキ内にも進入できる高い移動能力を必要とする。これまでに、情報収集型ロボットの移動システムとして、形状変化機能をもったクローラ型全方向移動システムCUBIC-Rを提案してきた。この移動ロボットは、六面体からその展開形状に変形することができるため、段差・階段・ギャップ等の不整地路面を走行することができる。さらに前後左右方向に移動体であるクローラユニットが連結されているため、ロボットを旋回させることなく前後左右方向に移動できることを特徴としている。この特徴により、前後方向に移動困難なガレキ路面があったとしても、左右方向への移動が可能な状況であれば、走行不能に陥る可能性を低減でき、情報収集範囲を拡大することが期待できる。しかしながら、CUBIC-Rは、幾つかの問題点(重量が重い、構造が複雑、移動時のバランスの悪さ)があるため、これらの問題点に改良を加えたCUBIC-R+を開発したので報告する。

キーワード 情報収集ロボット, 移動機構, 形状変化機能, 大規模災害, 救助作業

1. はじめに

阪神淡路大震災やアメリカ同時多発テロを契機に、防災システム、救助システムのあり方が議論されている^[1, 2]。人間が要救助者を救助するためには、二次災害の危険性の有無を調査し、救助手法を決定する必要がある。多くの災害情報(例えば、要救助者の存在の有無、その位置、また危険な建物の内部および外部の状況)を必要とする。これらの情報収集は、余震等による二次倒壊の可能性のある建物内外部での活動となるため危険が多い。このため、情報収集ロボットの利用が期待されている。

近年、これら災害地で活動する情報収集用ロボットの活動領域を拡大するため、高い踏破性能を有する移動システムの研究開発が行われ、幾つかの有効なクローラタイプのロボットが提案されている^[3-12]。クローラ(無限軌道または無限軌条, キャタピラは登録商標)は、車輪、多足歩行などの他の移動手法に比べ、接地面積が大きいため、ガレキなどの不確かな路面に対しても単純な制御で比較的確実に動力を伝達でき、また接地圧を分散できるため、2次倒壊を引き起こす可能性を抑えることができるというメリットがある。一方、不整地の移動システ

ムがもつ一般的な課題として、段差や階段などの大きなガレキ構造上を走行するためには大きなボディを必要とし、狭所に進入するためには小さなボディを必要とするので、このような物理的に相反する課題を解決する必要があった。そこで、小型のクローラを直線状に連結させることにより、ロボットの前後進方向の走行能力を向上させる移動システムが開発されている^[3-7]。このタイプのロボットはその形状から前後進行方向の断面積が単一のクローラと同程度であるため、ガレキで構成された小さい開口への進入能力はこれと同程度である。

また、クローラにアームを装備し、このアームの運動とクローラの運動を協調動作させることにより、クローラのみでの走行能力以上の能力や、アームで複数台のロボットを連結することにより、前述の直線連結型のクローラロボットと同様の機能(階段走行機能など)を付加しているものもある^[8, 9]。

単一のクローラのみでは、図1(a)に示すように、前後進行方向に対しては、高い走行能力を有するが、旋回方向に対しては、ほとんど走行能力を持たない。

そこで、図1(b)のようにクローラを直線状に連結させて、連結部に自由度を持たせることで、クローラを円弧型に変形させ、進行方向を転換させる手法を取るものがある^[4, 5, 7]。

上述した移動システムは基本的には直線状に連結し

* 独立行政法人 消防研究所 基盤研究部

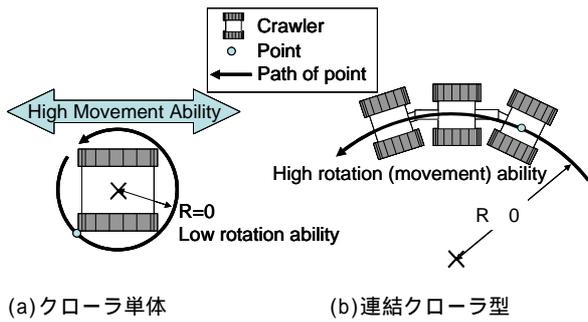


図1 ガレキ上における方向転換の方法

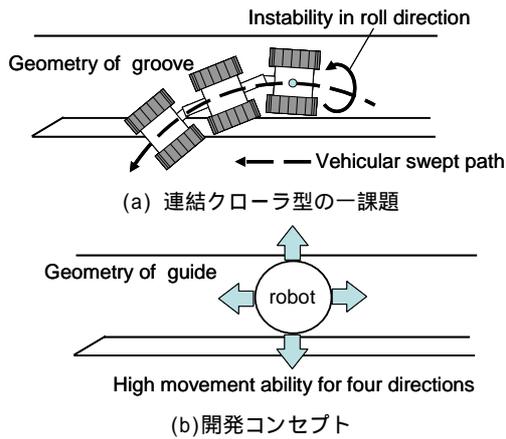


図2 移動システムの開発コンセプト

た形態をとるため、例えば、図2(a)のようなガイド地形の底面を走行中、このガイドから脱出する場合にはロール方向に不安定になる。このため、時にはロールしてしまっただけで脱出できない場合がある。ガレキ路面はこのほかにも予期できない様々な状況が考えられるので、前後方向だけでなく、図2(b)のように左右方向にも走行能力を有することが望ましいと考え、筆者らは、情報収集の活動領域を拡大するための一手法として、前後左右方向に連結型クローラと同程度の走行能力を有するクローラタイプの移動システムCUBIC-Rを開発してきた^[10-12]。

本報告では、走行実験によりCUBIC-Rに幾つかの問題点が判明したので、これらの解決内容について述べる。

第2章にこれまで開発してきたCUBIC-Rの概略について述べ、第3章では、基本的な走行試験の際に判明した問題点とその解決方法について述べる。第4章では、これらの問題点を改良するために製作したCUBIC-R+について述べて、第5章に本報告をまとめる。

2. CUBIC-Rの開発

2.1 基本構造

図3に提案しているCUBIC-Rの構造を示す。図3(a)に示すように、プラットフォームは、六面体形状であり、各面の外側に1対のクローラをもつクローラユニットが1基取り付けられている。また、1自由度の面開閉機構により、路面状況に形状に変形し、ガレキ上を走行したり、ガレ

キ内へ進入することができる。

また、各面にクローラユニットと面を連結する結合機構が備わっている。この結合機構は、受動的1自由度の軸とブレーキ機構を有している。この機構により、接地しているクローラユニットを超信地旋回(その場転回)することで、プラットフォームに対して任意の相対角をとることができ、ブレーキによりその方向を保持させることができる。

2.2 移動戦略

CUBIC-Rの活動エリアは、2次倒壊の危険性のある半壊家屋内としている。また、このような現場に限られるというのではなく、人間がアクセスできない現場までガレキ上を走行し、情報を収集することも想定している。

比較的平坦な路面や下り坂においては、CUBIC-Rは格納モードで走行する。このモードは接地しているクローラユニットを超信地旋回することにより、ロボットの旋回半径を小さくすることができるので、小回りが利く。

段差、階段または登り坂などの大きなガレキ構造の不整地路面では、面開閉機構を用いて、ガレキの路面状態に対応してプラットフォームを変形させ、走行する。これらの不整地に対する移動戦略については、すでに他の文献に記述しているので^[10-12]、ここでは省略する。

CUBIC-Rのメカニズムは、いわゆるヘビ型と呼ばれる直線連結型のクローラタイプの移動システムと類似しているが、前後左右に連結しているため、プラットフォームの方向転換動作を必要とせず、このための空間を必要としないということが大きな特徴である。その代わりに、前後進行方向へのロボット断面積はヘビ型よりも大きくなるため、ガレキ内への進入能力を若干犠牲にしている。

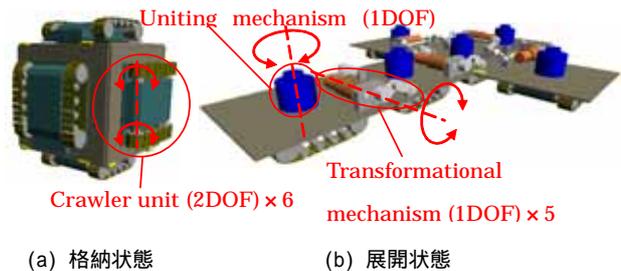


図3 CUBIC-Rの概観



図4 CUBIC-R試作機

表1 CUBIC-R試作機の仕様

Total Weight	31.0kg
Cubic Size (Without Crawler unit)	260 × 260 × 260mm
Robot Size (Standard mode)	360 × 360 × 360mm
Robot Size (Full expansion mode)	1040 × 780 × 210mm

2.3 CUBIC-R 試作機と走行試験

提案した上述の移動戦略を実証するために 図4に示すCUBIC-Rの試作機を製作した。表1に製作したCUBIC-Rの仕様を示す。

この試作機は、ニッケル水素バッテリー7.2Ahを搭載しており、バッテリーを用いた運用時間は40分程度である。

この試作機を用いて、想定した不整地における基本的な走行能力を確認し、十分な走行能力を有していることを確認した^[12]。さらに、この実験の中でいくつかの解決すべき問題点に関する知見を得た。

3. CUBIC-Rの問題点とその解決方法

本章では、前章の走行実験から判明した問題点とその解決のためのアプローチについて述べる。

3.1 CUBIC-Rの問題点

(1) 重量

表1に示すように、ロボットの重量が31kgとやや重い。ロボットを軽量化することで、踏破能力の向上が期待でき、落下時の衝撃を抑えることができる。なによりも、運用面を考慮すると軽量化が必要である。

(2) バランス

図5のようにLong directionとShort directionが存在するため、展開状態ではロボットの重心位置がややSurface 5側にある。このため、任意の姿勢・形状に対する重心位置の把握が難しい。段差やギャップ上を走行する際には、重心位置が段差上に乗っているか、またぎ走行が可能なギャップ長であるかを判断する必要がある。本ロボットは遠隔操縦を前提としているので、操縦者が把握しやすい重心位置をもつロボット構造にする必要がある。

また、図6のように走行しているガイド地形の底から脱出する場合において、Long directionの走行からShort directionの走行に切り替えるが、この際に重心位置の関係からロール方向への力が常にかかりロールしてしまう。ローリングを避けるためには、Long direction方向の面を格納し、重心をロール軸上に移動させなければならないが、そのための操作が必要になる。この格納動作時にも、ロボット重心の偏りからロールしてしまうために、ガイドの壁にShort directionの面を展開させて把持した状態にしなければならないが、操作がより煩雑になっていた(図6(b))。

さらに、上述の理由から、ロボットのロール方向のバランスをとるために、Short direction方向への走行時には、

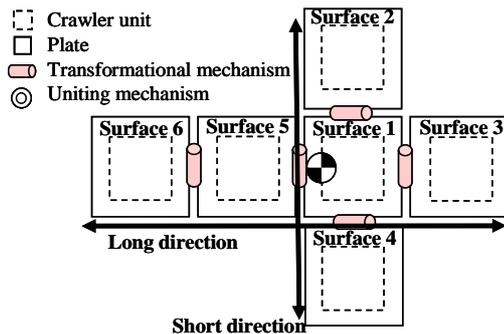
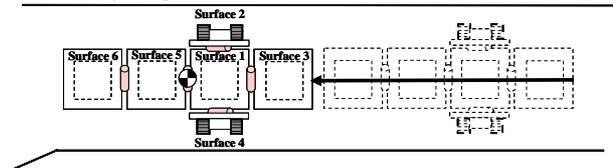
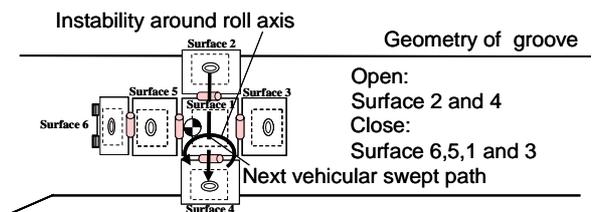


図5 面番号の割振り(上面図)

Geometry of guide



(a) long DirectionのSurfaceを用いた走行



(b) Short DirectionのSurfaceを用いた走行への切替え動作

図6 ガイド地形からの脱出動作 (上面図)

Long directionの面を格納しなければならないため、重心位置が高くなり、ピッチとロール方向への安定性が悪くなるという問題もあった。

(3) 操作性

CUBIC-Rはアクチュエータを総数にして23個有しており、これまでは、各アクチュエータの動作をキーボードの各キーに割り当ててロボットを操縦していたが、ロボット形状とキーボードのキー配置との関連性がないため、直感性に劣り、その操縦は非常に煩雑になっていた。このため、インタフェースの簡略化が必要である。

また、図5におけるLong directionの存在は、ガレキ走行時のロボットの面の操作においても、複雑にしている。なぜならSurface 6の開閉操縦は、他の面のようにSurface 1との展開角だけでなくSurface 5の展開角にも依存するからである。Surface 6の展開角 θ_6 は(1)式で表される。

$$\theta_6 = \theta_{1-5} + \theta_{5-6} \quad (1)$$

ここで、 θ_{1-5} はSurface 5とSurface 1の相対角、 θ_{5-6} はSurface 5とSurface 6の相対角である。このSurface 6の目標角を人間がリアルタイムに判断し、操作することは困難である。

(4) 駆動力の伝達

ガレキ上の走行や階段走行において、路面へ駆動力を伝えるクローラベルトよりも、プレートが突出していたため

に(図5), プレートが先に障害物に接触してしまい, 進行できなくなる問題が度々発生した. この問題は, ガレキ上における走行であれば, その都度, 面を格納させて前進し, クローラが路面に接触してから, 面を展開させるという動作が必要となるので, 操作が煩雑になった.

また, 階段を上るときはより顕著であり, 前方の突出したプレートが次のステップに引っかかり, 登れない場合があった. この状況を回避するためには, 現在のステップから落下しないように注意しつつ, 前面のプレートが次ステップに接触しないように登らせる必要があるため, 非常に難しい操作となる. このような操作は目視できない遠隔操縦では, 非現実的である.

3.2 問題解決へのアプローチ

このロボットの最大の特徴である前後左右方向への移動能力を確保しつつ, 前節の問題点を解決するために, 図7に示すロボット形態に変更した. 本ロボットの構成とその改良の詳細を以下に示す.

(1) Surfaceの排除

図7に示すように, 図5におけるSurface 6を排除し, Surface 1の中央に重心がある対称的な形状をした5面からなる移動機構とした. この構成は, Surface 6の構成部品であるクローラユニット, 面開閉機構, プレートとアクチュエータを駆動するコントローラ類を取り去った形態である.

これにより, 以下の点が改善される.

- ロボット重量が一面分軽量化されるので, 運動能力を向上させ, 落下による衝撃を緩和できる. 軽量化は運用面を考慮しても望ましい
- アクチュエータ数が減少するため, インタフェースが簡略になる
- 重心高さが低くなり, より安定した走行が可能になる
- ロボット重心がロボット平面図における幾何学重心に存在するので, 操縦者は重心位置を把握しやすい(図7(b))
- 前後左右の構造が対称になるため, ロール方向に対してより安定になる
- 移動方向(Short directionとLong direction)を区別する必要がない

以上より, Surface 6を排除することにより, 3.1(4)項以外の問題点に対して改善を図ることができる. 特にロボットバランスの問題は改善できていると考える. しかしながら, Surface 6の排除によって, ひっくり返ることによる移動不能状態が回避できないという問題が新たに生じる. この問題の解決方法については後述する.

(2) クローラユニットの突出

3.1(4)項の問題を解決するために, 図7のようにプレートよりもクローラを外側に突出させる構造にした. これにより, 最初にクローラがガレキに接触するため, 路面に駆動力をより確実に伝達することができる.

(3) 転倒からの起上り動作

クローラがプレートの外側に突出させることのもう一

つの利点として, ひっくり返ったときの起上りが可能になるということがある. 例えば, 完全にひっくり返ったときの状況を図8(a)に示す. 操縦者はロボットがバランスを崩したと判断したときに, 面を格納させる. このとき, ロボットのクローラが進行方向に向いていると考えられるとクローラが突出しているために, クローラが接地状態となる. すると, 図8(a)-(b)のようにロボットを移動させるとガレキなどの段差に接触するので, クローラの駆動力によりピッチ方向に回転力が発生する. そのまま, クローラを駆動していると図8(c)-(d)のようにロボットのピッチ角が大きくなり, 接地点よりも重心位置が後方になるので, ロボットは復帰できると考える. これは, CUBIC-Rの段差踏破におけるピッチ方向への回転運動をヒントに発想したものである^[12].

(4) 操作性の向上

これまではPCのキーボードを用いてロボットの操縦を行ってきたが, 操縦をより直感的にするため, 図9に示すゲームコントローラ(プレイステーション, SCE製)を用いたロボットコントローラを開発した. このコントローラを選定した理由は以下の通りである.

- ボタン数が多いので, アクチュエータ数の多いロボットの操縦に向いており, 多くの動作に対応させることができる

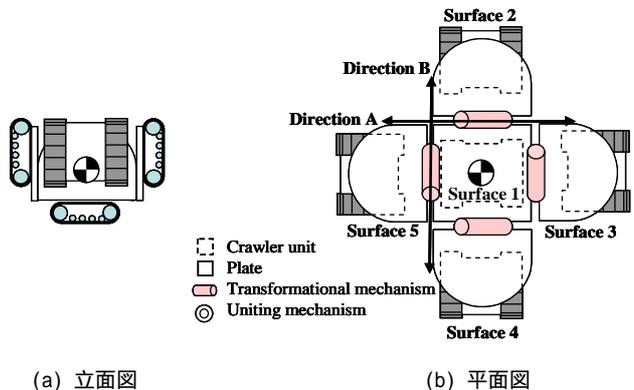


図7 CUBIC-R+の構成

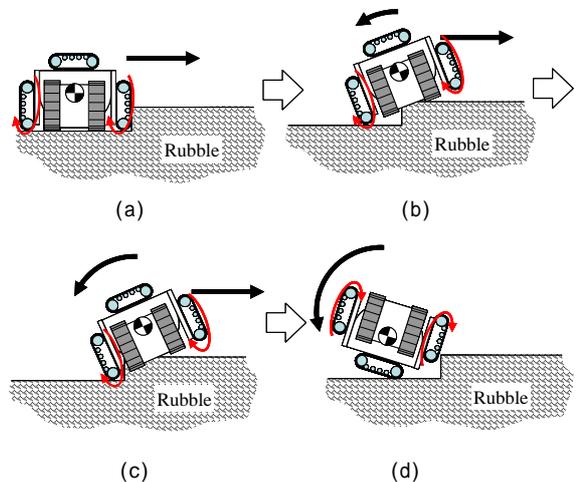


図8 起上り動作(戦略)

- 十字型ボタンがロボットの形態に類似しているので、各surfaceを割り当てることができ、直感的な操縦ができる
- ジョイスティックが2本装備されているので、移動体の操縦を行うラジコンのコントローラと同様の移動操縦が可能である
- 小型軽量なので、立ったまま手に持って操縦できる
- デザインが手になじみやすい

ロボットの方向転換や移動を行うための基本的な操縦の流れは、任意の面を選択しながら、クローラユニットと面開閉機構の動作を選択するという流れとなる。コントローラの動作割り当てを表2(図7,9参照)に示す。

4. CUBIC-R+の製作と評価

前章で述べたCUBIC-Rの課題とその改良方針に従って図10に示すCUBIC-R+を製作した。その主な仕様を表3に示す。また、本ロボットのシステムブロック図を図11に示す。

改良したCUBIC-R+は、CUBIC-Rをそのまま改造したため、実装スペースがなく、バッテリーは搭載されていない。したがって、表1と比較すると約9kg程度の軽量化が達成されているように見えるが、CUBIC-Rでは3kg程度のバッテリーが搭載されていたため、5面形態による純粋な削減重量は、6kg程度である。今後はバッテリー搭載を含めた新たな設計が必要となる。

表4に半壊家屋内で想定される基本的なガレキ上の走行実験をおこなった結果を示す。段差、ギャップは、CUBIC-Rよりも走行能力が低くなっているが、これはクローラ連結数が減り、ロボット長が短くなったためである。

操作性においては、Surface 6の排除によるロボットバランスの改善、アクチュエータ数の減少、またロボット形態に近いボタン配置のコントローラを採用したために、方向転換や面開閉機構の操作に関して大きく改善された。

クローラの突出については、若干改善されたように感じるが、クローラユニット厚が小さいことや駆動力が不足しているので、面開閉動作の頻度はあまり変化しないように感じた。今後は、これらのクローラユニット単体の課題を改善することで、ロボット全体の走行能力の向上を目指す。

最後に、3.2項(3)で議論したひっくり返った状態からの復帰を確認する実験のスナップ写真を図12(a)-(j)に示す。本実験により、想定した起上り動作が可能であることを確認した。なお、本実験で用いた障害物の垂直段差の高さは160mmである。

本実験により、5面形態にすると6面形態の場合よりも格納状態におけるロボット重心が下方に移動するので、ガレキ上の走行中にロボットがバランスをくずして転がったとしても、真上から落下しない限り、図12(f)-(j)のように、起上り小法師と同様の動作で、ロボット自体が振動しながら自動的に復帰できる現象を確認できた。

5. おわりに

本報告では、最初に前後左右方向に大きなガレキ構造上の走行だけでなく、狭いスペースへの進入能力を有するCUBIC-Rについての概要を述べた。次に、製作したCUBIC-Rの問題点とその問題を解決するためにロボットの形態とインターフェースを見直した。最後に、CUBIC-Rの改良機である5面型のCUBIC-R+を製作し、その基本能力と、起上り戦略についての確認を行った。

今後の方針としては、操縦者がロボットを目視できない状況での遠隔操作のためのインターフェースについての検討を行う。具体的には、様々な路面状況での基本的な移動戦略を抽出と、半自律移動のための力学的な検討を行う。

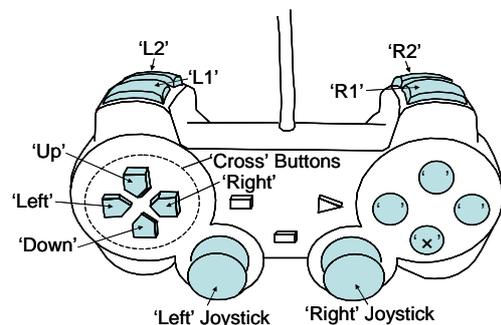
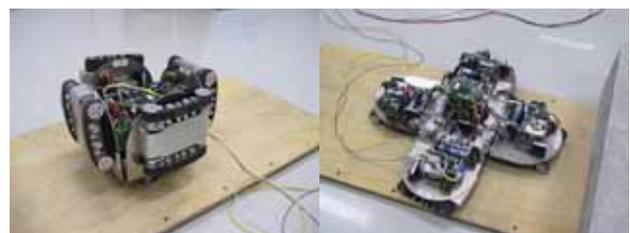


図9 ボタンとジョイスティックの割り当て

表2 ロボット操作の割り当て

Surface(s)	Assigned Button	Motion	Assigned Button or Joystick
Selection of Active Surface(s)		Motion of Surface(s)	
All Surfaces	'R2'	Open	' '
		Close	'x'
Surface1,	'R1'	(direction A)	'Up' or 'Down' and
		Open	' '
	'Cross' Buttons	Close	' '
Surface2,	'Right'	(direction B)	'Left' or 'Right' and
		Open	' '
		Close	' '
Surface3,	'Up'	Direction Control of Crawler Unit(s)	
Surface4,	'Left'	Turn1	'Right' Joystick
		Turn2	'L2' and
		Turn3	'Right' Joystick
Surface5	'Down'		'L1' and
			'Right' Joystick
		Movement Control	
		Forward or Backward Movement	'Left' Joystick



(a) 格納状態

(b) 展開状態

図10 CUBIC-R+の試作機

表3 CUBIC-R+試作機の仕様

Total Weight	22.0kg
Cubic Size (Without Crawler unit)	248 × 248 × 220mm
Robot Size (Standard mode)	348 × 348 × 270mm
Robot Size (Full expansion mode)	681 × 681 × 210mm

謝 辞

本研究は文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクトの一環となされたものである。

文 献

- [1] 高森, “レスキューロボット機器研究会報告書”, 日本機械学会 ロボティクスメカトロニクス部門研究会, 1997年1月17日.
- [2] Murphy.R.R, Resucue Robots at the World Trade Center”, Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, special issue on Disaster Reponse Robotics, vol.102, no.1019, pp.794-802, 2003.
- [3] <http://www.packbot.com/>
- [4] T.Takayama et al. ,Development of “Souryu I & II” –Connected Crawler Vehicle for Inspection of Narrow and Winding Space-, Journal of Robotics and Mechatronics Vol.15, No.1, pp.61-69,2003.
- [5] M.Arai et al. Development of “Souryu-III”:Connected Crawler Vehicle for Inspection inside Narrow and Winding Spaces, Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and System, pp.52-57, 2004.
- [6] W.Lee et al., ”ROBHAZ-DT3 : Teleoperated Mobile Platform with Passively Adaptive Double-Track for Hazardous Environment Applications”, Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and System, pp.33-38, 2004.
- [7] K.Osuka et al., “Development of Mobile Inspection Robot for Rescue Activities: MOIRA”, Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and System, pp.3373-3377, 2003.
- [8] M.Guarnieri et al., “HELIOS VII: a New Tracked Arm-Equipped Vehicle”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.15, No.5, 2003.
- [9] M.Guarnieri et al., “Development of Helios VII: an arm-equipped tracked vehicle for search and rescue operations”, Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and System, pp.39-45, 2004.
- [10] 田畑, 稲葉, 張, 天野, “情報収集(被災者捜索)ロボットの移動機構に関する研究”, 岐阜県生産情報技術研究所研究報告書, No.4, pp.31-36, 2003.
- [11] 田畑, 稲葉, 張, 天野, “情報収集(被災者捜索)ロボットの移動機構に関する研究”, 岐阜県生産情報技術研究所研究報告書, No.5, pp.13-18, 2004.
- [12] K.Tabata et al., “Development of a Transformational Mobile Robot to Search Victims under Debris and Rubbles”, Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and System, pp.46-51, 2004.

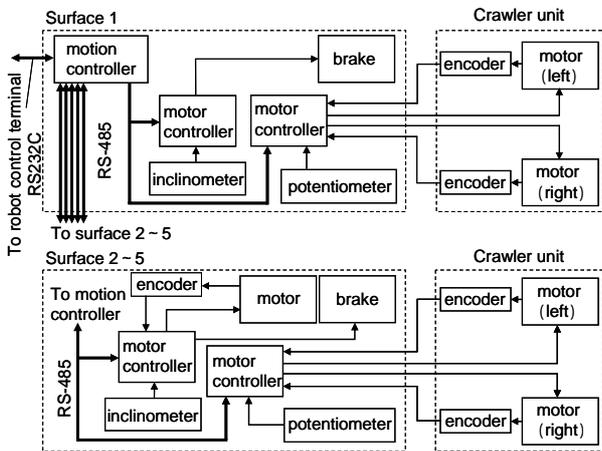


図11 CUBIC-R + 試作機のブロック図

表4 CUBIC-R+およびCUBIC-Rの走行実験結果

Item	Result		
		CUBIC-R+	CUBIC-R
Going up a slope	Inclination	37 degrees	38 degrees
Traversing a step	Height	240 mm	320 mm
Traversing the stairs	Angle of flight (rise 160 mm, tread 230 mm)	35 degrees	Same as the left column
Traversing across a gap	Width	350 mm	400mm
Escaping from a groove	Width Depth	500 mm above 200 mm	Same as the left column

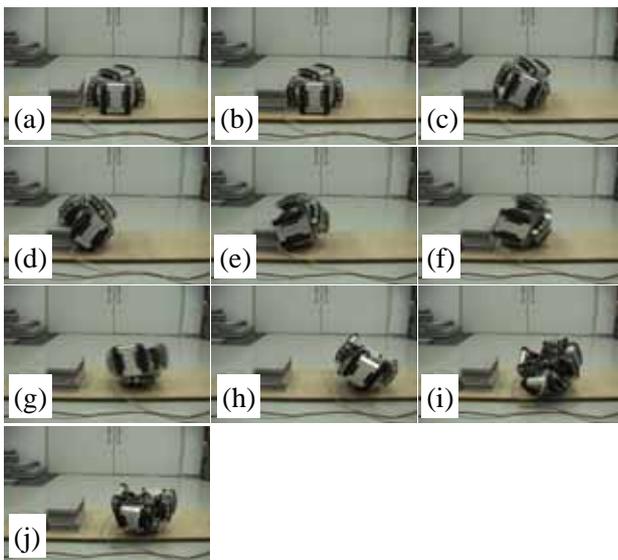


図12 起上り動作(実験結果)

情報収集(被災者捜索)ロボットの移動機構のハードウェアの改良

田畑 克彦 稲葉 昭夫 天野 久徳*

Improvement of Mobile Robot Mechanism to gather Information for Relief Activities

Katsuhiko TABATA Akio INABA Hisanori AMANO*

あらまし 我々は大震災等の大規模災害後の救助活動において、被災者やその周囲の情報を収集する情報収集ロボットの活動区域を拡大するための高踏破能力を有する移動システムを開発している。開発している移動システムはガレキ上を移動でき、ガレキ内にも進入できる移動能力を有し、移動不能を回避するために全方向にわたって移動できる構成としている。本移動システムは、この開発コンセプトを実現するために幾つかの移動のための機構やセンシング機構を持つように製作されたが、ガレキ上走行実験などによりこれらの機構がもつ課題が判明した。本報告では、それらの改良を行ったので報告する。

キーワード 情報収集ロボット, 移動システム, 機構の改良

1. はじめに

現在、震災などの大規模災害後の要救助者を検索するためのレスキューシステムに関する研究が数多く行われており、その中で情報収集ロボットは、救助隊員などの救助者による検索が困難な場面での運用が期待されている。救助者による検索が困難な場面は、検索する区域の空間が狭く人間では検索活動できない、もしくは人間が検索するには二次災害の危険が伴う区域である。前者は想像に難くないが、後者には検索区域に有毒ガス(一酸化炭素, 二酸化炭素, もしくは可燃性ガスなど)が充満している,あるいは余震や火災による構造物の弱体化により二次倒壊の危険性がある,などが考えられる。

二次災害の可能性のある環境下では、崩壊した構造物のガレキだけでなく、崩壊を免れた構造物,たとえば、階段, 段差などが存在する。したがって、ロボットが活動するためには、十分な移動能力を持った移動システムが必要となる。

そこで、我々は二次災害の危険性がある家屋内での情報収集を想定し、移動システムの研究開発を行ってきた^[1-3]。具体的には、クローラを変形機構により連結した移動システム(図1,2)であり、不整地路面に対応してそのプラットフォームを変形させることでガレキ, 階段, 段差などの様々な不整地路面を走行できる^[2,3]。さらに、前後左右に連結しているためロボットを旋回することなく方向転換することができるため、前後に移動できない状況であっても、左右方向へ進行方向を切り替えること

ができる。我々は、このロボットを”CUBIC-R+”と呼んでいる。

しかしながら、走行実験を行った結果、機構的な課題が明らかになったので、その改良について報告する。

2. 機構の課題とその改良

本章では、機構の課題について論じ、その課題を克服するための解決手法について述べる。

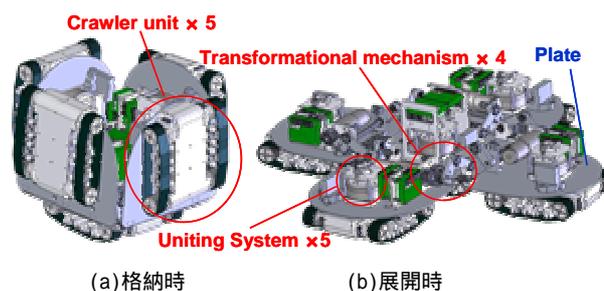
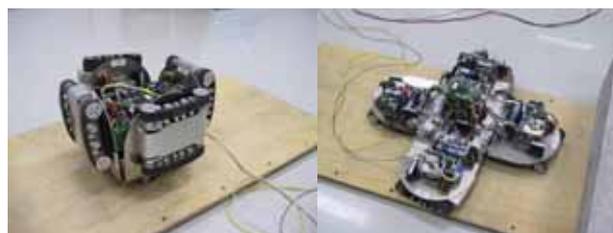


図1 CUBIC-R+の構成



(a) 格納時 (b) 展開時

図2 CUBIC-R+のプロトタイプ

* 独立行政法人 消防研究所 基盤研究部

2.1 結合機構のブレーキ制動力の改善

図1に示すように各クローラユニットとプレートには、これらを結合する結合機構が備わっている。この結合機構は、パッシブな1自由度の軸とブレーキ機構を有しているので、接地しているクローラユニットを信地旋回することにより、プレートに対してアジマス方向に任意の相対角をとることができ、ブレーキによりその方向を保持させることができる。

現在、この結合機構のブレーキとして電磁ブレーキを用いている。電磁ブレーキは、通電すると固定部の電磁石の働きにより、回転部を吸着し制動力が発生するものである。この機構は、制動力を超える回転力が印加されても回転部がすべるので、機械的に破損する恐れはないが、制動力が大きいものは大型になり重量もかさむ。図2で使用している電磁ブレーキは小倉クラッチ製で制動トルクは6Nm、結合機構全体の重量は576gである。

CUBIC-R+の走行実験の結果、段差に対して斜め方向から登った場合などの、ガレキ走行時に片側のクローラのみが接地している場合において、クローラユニットにおよぼす回転力が結合機構の制動トルクを超えて、クローラユニットが回転してしまうことがしばしば発生した。

そこで制動力を増すために、図3に示すストッパを用いて機械的にロックするブレーキ機構を考案した。

ブレーキの原理は、結合軸に固定されたブレーキディスクの穴に、アクチュエータとバネによりピン型のストッパを上下させて脱着させるというものである。

ブレーキ解除時は、カムを回転させて2つのスライダとこれと一体になっているストッパA,Bを下方に変位させて、ブレーキを解除する(図3の状態)。

ブレーキ時はさらに90°カムを回転させることでバネの復元力により上方に変位し、クローラユニットの回転によりどちらかのストッパが最寄りのブレーキ穴に入りブレーキする。この時、ストッパがそれぞれ独立に上方へ変位するため、どちらかのストッパがブレーキ穴に入った場合、もう一方のストッパはブレーキディスク上にとどまる状態となる。ここで、ストッパAはブレーキディスクの外穴に、ストッパBはブレーキディスクの内穴に入るように実装されている。

2つのストッパを用いた理由は、ロボットへの実装の空間的制約から、ブレーキディスク径を小さくする必要があったためである。

製作した結合機構を図4に示す。仕様はクローラユニットの回転分解能が10°、結合機構全体の重量が565gである。

以上より、重量を増やすことなく、機械的にロックすることにより十分な制動力をもつブレーキを開発した。

2.2 クローラユニットの改良

(1) 防塵機構の付加

先に述べたとおり、CUBIC-R+の活動エリアとして、二次倒壊の危険性のある半壊家屋内を想定している。このような現場においては、ロボットに対して防塵機能を

持たせることが必要である。

例えば、新潟中越地震後の被災アパート内におけるクローラ型ロボットの走行実験では、コード等のひも状のものや、布団等がクローラ部等に絡まった事例の報告がある^[4]。また、米国における同時多発テロ後においても、被災者探索ロボットが運用されたが^[5]、搭載の可視光力

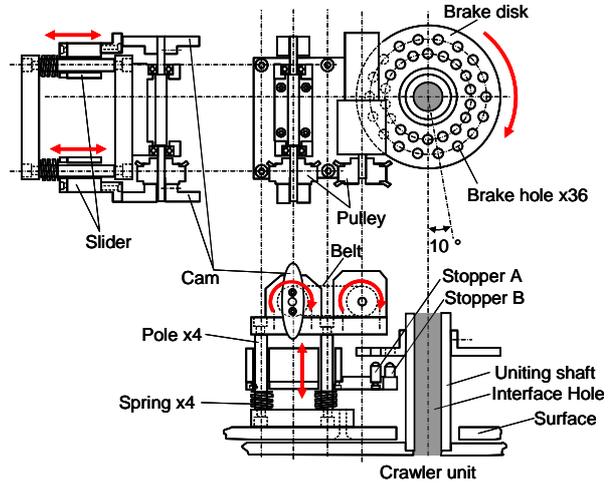


図3 結合機構のブレーキメカニズム(ブレーキ解除時)

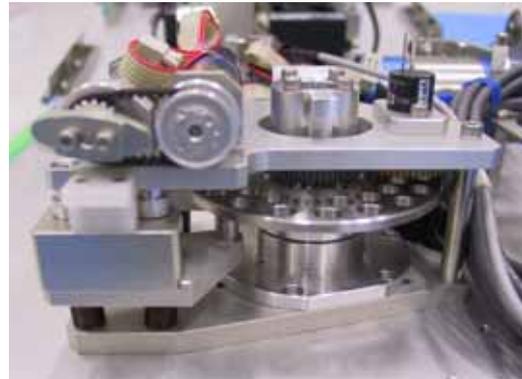


図4 製作した結合機構

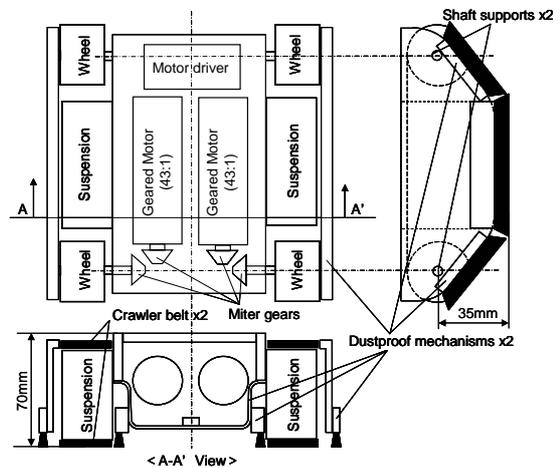


図5 防塵カバーの取付け

メラで人であるかどうか判別が困難なほど、塵が積もっていたケースがあった^[6]。

そこで本年度は、ロボットの走行能力に最も影響のあるクローラユニットに対する防塵機構を付加することとした。

防塵機構は保護カバーを用いた。これらの取付位置は図5に示すように、クローラの外側と内側側面部、クローラユニット筐体の下部全体である。

外側と内側側面部に関しては、サスペンション部にストロークが存在するので、ストローク部は刷毛の先などの柔軟な多毛構造とした(図5の台形黒色部分)。また、外側側面部はクローラ部のホイール軸を延長し、この軸で側面部を保持する構造とした。これにより、カバーは両持ち構造となるので強度を保てる。また、段差に対して斜めに進入する場合、クローラベルトを外す方向に力が働くので、時に外れてしまう場合があったが、本カバーによりクローラベルトのガイドの役割を果たし、外れにくい構造とすることができる。

以上より、カバーによる簡易な防塵機能を付加するとともに、クローラベルトが外れにくい構造とすることができた。

(2) クローラユニット単体の移動能力の向上

ガレキなどの不整地を走行する際、面開閉機構の変形機能を用いれば、240mmの段差を乗り越えることができるが、オペレータの負担を軽減するために、通常はできるだけ面開閉機構を用いないほうが望ましい。この場合には、クローラユニットの厚みが重要となり、平地の段差乗り越え能力は、理論的にはクローラの出力ホイール軸の取付高さ以下の段差高さとなる。したがって、よりコントロールレスで踏破能力を向上させるためには、ユニット厚を増やし、出力ホイール径を大きくすることが望ましい。

しかしながら、情報収集ロボットの場合、狭所への進入能力を合わせ持つことが必要であり、単純に厚みを増やすと、ロボットの高さが増し、進入能力が低下する。

そこで、ロボット展開時(図1(b))の高さを維持するクローラ厚とすることを設計方針として、2.1項の結合機構の薄型化や実装を見直すことにより、従来50mmであったクローラ厚を70mmにすることができた(図6, 7)。これにより、平地における段差乗り越え能力を理論値で24mmから35mmに改善することができた。

また、実装可能な範囲で走行能力を向上させるために、ホイールの駆動トルクを減速比を上げることにより従来の約3倍にし、走行速度の低下を補うために、ホイール径を40mmから60mmに変更した。

(3) 接地位置の検出機構の改良

ガレキ上走行におけるロボットの操縦は、予想を超える困難さがある。現時点では、遠隔操縦を想定しており、そのためのマンマシンインタフェースを検討している。これまでの走行実験により、オペレータはどのクローラ

ユニットが接地しているか確認しながらでないとい操縦が難しいことがわかってきた。

そこで昨年度、前検討を行うために、どのクローラユニットが接地しているかを把握するための接地センサ機構をクローラユニットのサスペンション部に組み込んだ。

サスペンション機構は、図6に示すように、ベルトの張力を保つために天秤構造とし、ボールがスライダとジョイントの間をピストン運動する。あるアイドラが凸路面などで上方に変位すると、スライダとアイドラの間のバネが圧縮され、衝撃を吸収する。平地に戻るとバネの復元力によって平衡状態となる。

接地位置の検出機構としては、ジョイントとスライダの間に感圧センサを実装した。アイドラが接地して上方に変位した場合、バネが圧縮されるので、スライダとジョイントとの接触圧が増加し、感圧センサが反応する。感圧センサは、インターリンク エレクトリック社のFSR(感圧抵抗体素子)を用いている。このセンサは、圧力の増加により抵抗値が低下する小型(5mm)軽量で薄型(厚さ0.3mm)のセンサである。

しかしながら、昨年度製作の検出機構を動作確認した結果、変位した瞬間は抵抗値が変化するものの、徐々に定常(平衡)状態における抵抗値に戻ってしまうという問題が発生した。そのため、接地状態が続いているか否かを断続的に判断することは困難である。この現象は、ボールがピストン運動できるようにスライダとボールの間にクリアランスが存在することと、スライダとジョイントの接触面が片持ち構造であることから、FSRが面でしっかりと押されていないことが原因である。

そこで本年度は、図7に示す構造に改良した。サスペン

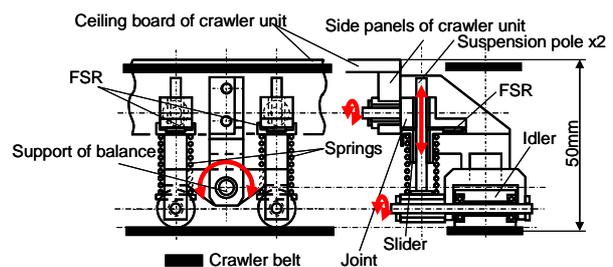


図6 昨年度の接地位置の検出機構

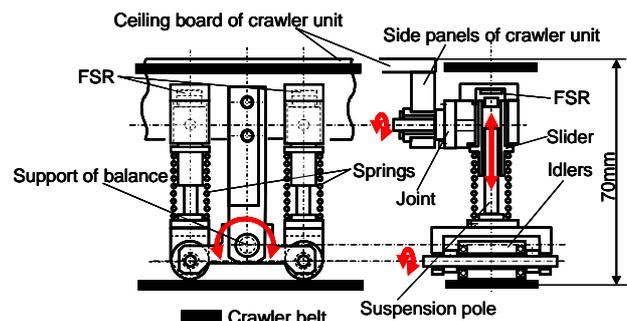


図7 本年度の接地位置の検出機構

ション機構の完成度は高いため、昨年度と同様のメカニズムを継承している。検出機構は前述のようにクローラ厚を大きくしたため、サスペンションをクローラベルト間に実装できる。このため、ポールがFSRを垂直に面で押す構造とすることができ、従来の問題点を解決できると考える。

また、サスペンションをクローラベルト間に実装できたので、図7のようにベルトとクローラユニット側板との隙間を小さくでき、より防塵性を高めることができた。

本年度試作したクローラユニットの写真を図8に示す。

2.3 ロボット実装の見直し

本年度は、本報告のほかにロボットの移動能力や操作性を向上させるため、既存の機体を改造し、ロボット形態の見直しをおこなっている^[7]。しかしながら、これまでの機体をさらに流用することは本報告で述べた改良モジュールやその他の部品実装の点で困難であるため、図9に示す3面型の部分試作機を設計/製作した。今後は、本報告で述べた改良モジュールの妥当性を走行試験等により評価する予定である。

3. おわりに

本報告では、これまで開発をおこなってきたCUBIC-Rの各モジュールのもつ問題点とその解決手法について述べた。これまでのガレキ上走行実験の結果から、よりガレキ上走行に整合したメカニズムを考案することができ、クローラユニットに対しては簡易な防塵構造を付加する



図8 製作したクローラユニット



図9 製作した部分試作機

ことができた。

今後は改良したモジュールの評価を行うとともに、ロボット上部カバーなどの検討を行い、防塵構造の強化を行う予定である。

謝 辞

本研究の一部は文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクトの一環としてなされたものである。

文 献

- [1] 田畑, 稲葉, 張, 天野, “情報収集(被災者捜索)ロボットの移動機構に関する研究”, 岐阜県生産情報技術研究所研究報告書, No.4, pp.31-36, 2003.
- [2] 田畑, 稲葉, 張, 天野, “情報収集(被災者捜索)ロボットの移動機構に関する研究-第2報-”, 岐阜県生産情報技術研究所研究報告書, No.5, pp.13-18, 2004.
- [3] Tabata, Inaba, Zhang, Amano, “Development of a Transformational Mobile Robot to Search Victims under Debris and Rubbles”, Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and System, pp.46-51, 2004.
- [4] 田所他, “フィールド・評価タスクフォース”, 文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクト 被災者救助等の災害対応戦略の最適化 レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発 第3回国際シンポジウム論文集, pp.457-494, 2005.
- [5] Murphy.R.R, “Resucue Robots at the World Trade Center”, Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, special issue on Disaster Reponse Robotics, vol.102, no.1019, pp.794-802, 2003.
- [6] 天野, 稲葉, 田畑, “表面硬さを利用した人体センサの実験的検討”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'03 講演論文集CD-ROM, 2P2-2F-A7, 2003.
- [7] 田畑, 稲葉, 張, 天野, “情報収集(被災者捜索)ロボットの移動機構に関する研究-第3報-”, 岐阜県生産情報技術研究所研究報告書, No.6, 2005.

ロボット関節用静電クラッチの開発

- 高齢者を支援するシステム(機器)に関する研究 -

西嶋 隆 山本 晃生* 樋口 俊郎* 今井 智彦 稲葉 昭夫

Development of an Electrostatic Clutch for Robot Joints

- System Design to support Welfare for the Aged -

Takashi NISHIJIMA Akio Yamamoto Toshiro Higuchi Tomohiko IMAI Akio INABA

あらまし 回転型静電モータを静電クラッチとして機能させることを提案した。本研究では、静電クラッチのプロトタイプを試作し、印加電圧によって保持力を調整可能であることを示した。また、静電クラッチの駆動用電極を移動子の回転角度を検出するセンサ用電極として併用する内蔵型のエンコーダを実装した。実験では静電クラッチの保持力と印加電圧の関係を調べ、1600Vの印加電圧で約16N・cmのトルクを生成した。内蔵型位置センサは静電クラッチを保持した状態から外力によって滑らせたときの回転角度を検出することが可能であることが確認され、その最大誤差は約0.28度となった。

キーワード 静電気力, 静電アクチュエータ, 静電クラッチ, 民生用ロボット

1. 緒言

近年、民生用ロボットの開発研究が活発に行われており、将来、少子高齢化による労働力不足をロボット技術によって補うことが期待されている。ロボットが人の周辺で活動する場合、ロボットと人の衝突安全性の確保は重要な課題である。この課題に対して、ロボットの外装に衝撃緩衝素材を装備する研究^[1]や、ロボットマニピュレータにMIA(Mechanical Impedance Adjuster)と呼ばれる機械的インピーダンスを制御する機械要素の研究^[2]がなされている。

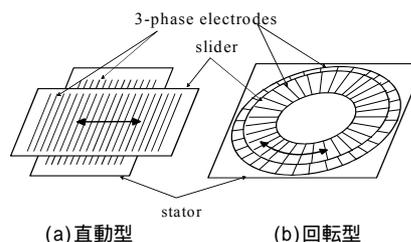
一方、筆者らはこれまでに、両電極交流駆動形静電モータ^[3]と呼ばれる静電モータを、ロボットに適用する研究を行っている。静電モータは軽量高出力、柔軟、ダイレクトドライブといった特徴を有しており、減速ギアを用いることなくロボットに組み込むことや、柔軟性をいかけた配置が可能である。さらに、静電モータに内蔵型の位置センサ機能を付加することも可能である^[4]。

本研究では、ロボットの衝突安全のために、回転型の静電モータを保持トルクが制御可能な静電クラッチとしてロボットマニピュレータに適用することを提案する。今回は静電クラッチのプロトタイプを試作し、その保持トルクや静電クラッチのすべり角度を検出する内蔵型の静電容量式のエンコーダ性能について報告する。

2. 両電極交流駆動形静電モータ^[3]

2.1 基本構成

図1に両電極交流駆動形静電モータ(以下、静電モータ)の基本構成を示す。静電モータの基本構成はFPC(Flexible Printed Circuit)基板フィルムからなる一対の移動子・固定子フィルムで構成される。それぞれのフィルムの厚さは約200 μ mであり、内部には帯状の三相平行電極が埋め込まれている。図1(a)は直動型モータの基本構成であり、図1(b)は帯状の電極を放射状に配置することにより、回転型とした基本構成である。駆動時は移動子・固定子を重ね合わせて用いるが、フィルム間の摩擦低減のために直径20 μ mのガラスビーズやプラスチックビーズをフィルム間ギャップに散布して動作させる。静電モータの発生推力は印加電圧の2乗に比例しており、通常1kV程度以上の電圧で駆動するが、そのような高電圧を空气中で印加するとフィルム周辺の空気中で絶縁破壊が発生する。そこで、それを防ぐために絶縁液(フロリナートFC-77 3M製、またはシリコンオイル)に浸した状態で使用する。



(a)直動型 (b)回転型
図1 静電モータの基本構成

* 東京大学大学院工学系研究科

2.2 スキュー電極^[5]

本静電モータは、移動子・固定子フィルム内の平行電極を互いに平行に対向させた場合では、大きな推力リップルがあることが確認されている。そこで、推力リップルを低減する方法として、スキュー電極を用いる方法が考案されており、その最適な配置方法が解明されている^[5]。

今回も静電クラッチの保持トルクが移動子位置によって変動することを防ぐためにスキュー電極を用いた。

2.3 駆動原理

図2に静電モータへの電源の結線方法を示す。静電モータは三相交流電源 $v = v_0[\sin \omega_1 t, \sin(\omega_1 t - 2\pi/3), \sin(\omega_1 t + 2\pi/3)]$ で駆動し、同図に示すように、移動子フィルムと固定子フィルムの帯状平行電極に対し、互いに逆順となるように結線する。三相交流電圧 v を印加すると、移動子・固定子フィルムには図中太線で示すような電位分布が励起され、それらは互いに逆方向に速度 $3pf$ で移動する。ここに p は電極ピッチ、 f は印加電圧周波数である。これら二つの電位分布には互いの空間的な位相差に応じた静電気力が働き、同期状態においては常に一定の位相差が保たれるように移動子が移動する。すなわち、二つの電位分布の相対速度がゼロに保たれるため、移動子は電位分布の速度の2倍の速度 $6pf$ で移動する。

基本的な駆動原理は前述したとおりであるが、モータを低速駆動もしくは停止保持する場合（印加電圧周波数が非常に低い場合）に推力が低下することが確認されている。そこで、これを解決する方法として、変調駆動法と呼ばれる駆動方法が考案されている^[6]。変調駆動法の模式図を図3に示す。変調駆動法では、駆動電圧の三相交流電圧を高周波数の搬送波 $\cos \omega_2 t$ と乗算し、 $v_e = \cos \omega_2 t v$ としてアクチュエータに印加する。この駆動方法では、通常の駆動方式と比べると、同一振幅時の発生推力が搬送波の実効値の2乗である1/2倍にまで低下するが、低速駆動時や停止保持時の推力低下を回避することができる。本研究のように、静電モータをクラッチとして機能させるには、停止保持時の推力を保つ必要があるため、変調駆動法を用いる。

3. 静電クラッチ

3.1 固定子・移動子フィルム

今回試作した静電クラッチは回転型の静電モータと同じであり、クラッチを保持状態にする場合は、モータの駆動周波数 ω_1 をゼロにすることによって行う。

図4に試作した静電クラッチの固定子・移動子フィルムの写真を示す。放射状に配置した電極は600本であり、電極間の中心からなす角度は0.6度、電極幅が中心からなす角度は0.3度である。2.3節であらわした直動型モータにおけるピッチ p を回転型モータの回転ピッチ角 θ_p で表すと、 $\theta_p = 2\pi/600$ rad となり、印加電圧周波数 f で駆動した場合の回転角速度は $2\pi f/100$ rad/s となる。

図5は試作したスキュー電極の模式図を示す。スキュー

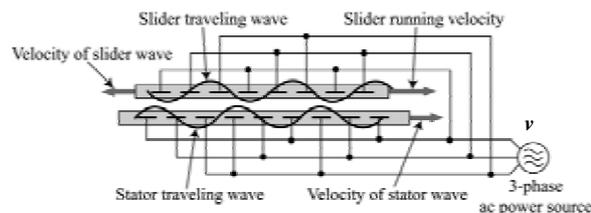


図2 駆動原理

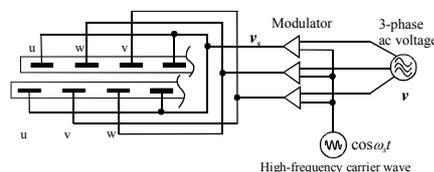


図3 変調駆動法

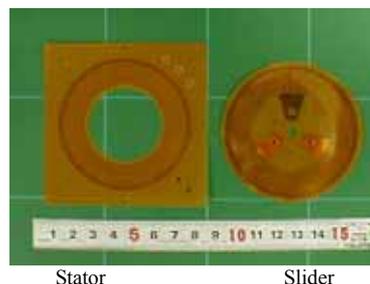


図4 静電クラッチ用静電フィルム

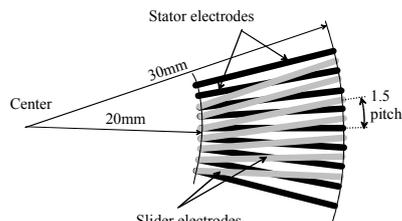


図5 スキュー電極の模式図

電極の配置は従来研究で推力リップルを低減するために最適な配置とした^[5]。移動子電極は固定子電極が完全に放射状に配置されているのに対し、固定子電極に対して傾いており、電極の長さ方向に渡って、固定子電極に対し1.5ピッチ分ずれて交差している。固定子電極と移動子電極の三相電極が対向する部分の内径と外径はそれぞれ40mm, 60mmである。

3.2 静電クラッチの組み立て

図6は、静電クラッチの写真を示す。静電クラッチのフレームはアクリル樹脂で試作した。フレームのサイズは幅92mm、奥行き92mm、高さ73mmである。

静電モータの推力は固定子・移動子フィルムの対向する電極面積に比例するため、固定子・移動子フィルムを複数組積層することで推力を増大することができる。今回は、移動子フィルム10枚、固定子フィルム11枚を積層した。固定子フィルムの内径側の隙間と移動子フィルムの外側の隙間にはスペーサとして厚さ200μmのポリイミドフィルムを挟み、固定子・移動子フィルムの給電は積層する際に電極のランド間に導電性ゴムのリングを挿入

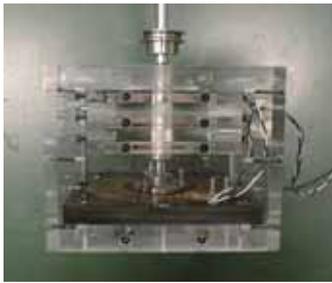


図6 静電クラッチ

し、ねじの締め付けによって行った。移動子フィルムは回転するため、給電は回転軸に取り付けられたブラシにより行った。フレーム内の移動子・固定子フィルムは絶縁液(フロリナートFC77 3M製)に浸した。

4. クラッチ内蔵型位置センサ

クラッチが保持トルクを上回る外力を受けた場合、クラッチはトルクリミッタとして機能するが、回転前の角度に復帰するためには、回転した角度を検出する必要がある。移動子の移動を検出する方法として、従来の研究において静電モータ駆動用電極を位置センサ用の電極として併用する方法が考案されており^[7]、今回もこの方式を用いてクラッチの回転角度を検出する内蔵型の位置センサを構成した。

4.1 原理

内蔵型位置センサの構成図を図7に示す。基本構成の静電モータ回路に入力トランスを介して高周波数の三相交流電圧(センサ信号)を駆動電圧に重畳し、出力トランスを介してセンサ信号を検出する。静電モータの三相電極で構成される静電容量は、移動子の位置に伴って変動するので、検出されるセンサ信号もまた、移動子位置で変化する。したがって、出力トランスの信号から移動子位置を検出できる。センサ信号の三相交流電圧 $v_s = v_s [\sin(\omega_s t), \sin(\omega_s t - 2\pi/3), \sin(\omega_s t + 2\pi/3)]$ を印加した時、回路に流れる電流 $i_s = [i_{us}, i_{vs}, i_{ws}]$ は次式で示される。

$$i_s = \frac{d}{dt}(Cv_s) \quad (1)$$

ここに、 C は静電モータの三端子間における 3×3 の静電容量行列である。静電容量行列の i 行、 j 列の要素 C_{ij} は電極 j に1Vの電圧を印加し、その他の電極を設置したとき

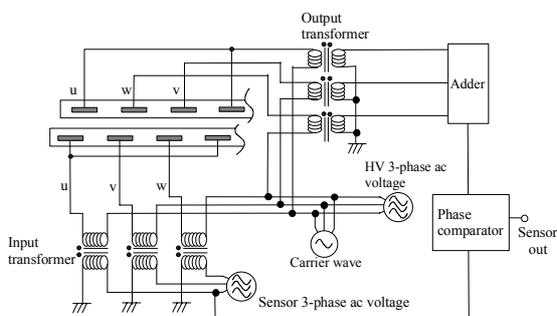


図7 内蔵型センサの概要図

に電極 i に誘導される電荷を示す。また、静電容量行列は対称行列となる。各容量係数は、電極の対称性を考慮すると移動子の電極が3ピッチ移動する毎に同じ値を示すと考えられる。したがって、計算の簡便のために移動子の回転角3ピッチ分を 2π とする電気角 θ_e を導入する。ここで、移動子回転角 θ とその電気角による表記である θ_e との関係は次式で示される。

$$\frac{2\pi}{3\theta_p} \theta = \theta_e \quad (2)$$

以上から、静電容量行列は次のように簡略化して表すことができる。

$$C = \begin{bmatrix} C_0 + C_2 \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & C_1 + C_2 \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \\ C_1 + C_2 \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) & C_0 + C_2 \cos(\theta_e) \\ C_1 + C_2 \cos(\theta_e) & C_1 + C_2 \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、 C_0, C_1, C_2 はモータの大きさや形状によって決まる定数である。センサ回路に流れる電流 i_s は式(1),(3)を計算すると以下ようになる。

$$i_s = \begin{bmatrix} i_{us} \\ i_{vs} \\ i_{ws} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha \cos(\omega_s t) + \beta \cos(\omega_s t - \theta_e + \frac{2\pi}{3}) \\ \alpha \cos(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}) + \beta \cos(\omega_s t - \theta_e - \frac{2\pi}{3}) \\ \alpha \cos(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}) + \beta \cos(\omega_s t - \theta_e) \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで、 α, β は C_0, C_1, C_2 、センサ信号の電圧 v_s 、トランスによって形成されるインダクタンス L によって決まる定数である。

式(4)における各相の電流は第1項目と第2項目の和で表され、第2項には、移動子位置 θ_e の情報が含まれている。各相の電流は移動子の移動に伴って、位相と振幅が変動する。また、各相の第1項目を i_{u1}, i_{v1}, i_{w1} とし、第2項目を i_{u2}, i_{v2}, i_{w2} とすると、 i_{u1}, i_{v1}, i_{w1} と i_{u2}, i_{v2}, i_{w2} はそれぞれ、長さが等しく、かつ3相の位相が 120 度ずつずれているため、

$$i_{u1} + i_{v1} + i_{w1} = 0 \quad (5)$$

$$i_{u2} + i_{v2} + i_{w2} = 0 \quad (6)$$

であり、各相の電流の和は

$$i_{us} + i_{vs} + i_{ws} = 0 \quad (7)$$

となる。つまり、三相の電流を加算するとゼロとなり、単純に加算しただけでは、移動子の位置情報を得ることができない。この電流の加算の様子を図8のフェーザ図に示す。このため、移動子の位置情報を得る方法として、各相の電流の振幅を規格化してから加算する、すなわち、各位相の電流の位相成分のみを加算し、加算後の位相情報を得る(図9)。各電流振幅を規格化した後に加算して得

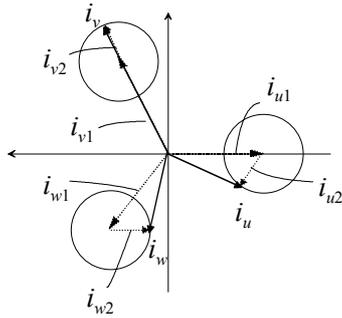


図8 電流の加算の様子

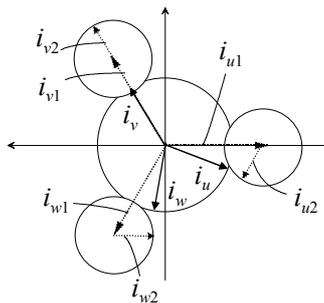


図9 振幅を規格化された電流様子

られる電流の位相は、センサ信号の三相交流電圧の位相に対して、移動子位置 θ_e が1周期（3ピッチ分の回転）毎に、360度回転するベクトルとなる。したがって、これらの位相を比較することで回転角度を得ることができる。

4.2 センサ回路の試作

・静電容量行列の測定

センサ回路を構成するにあたり、試作した静電クラッチの三端子によって構成される静電容量行列を求めた。

静電容量行列の各要素はインピーダンスアナライザを用いて測定することができる。静電クラッチをインピーダンスアナライザに接続した模式図を図10に示す。ここで、インピーダンスアナライザに接続した静電モータの三端子に印加する電圧とそのときに流れる電流をそれぞれ $v_a=[v_{ua}, v_{va}, v_{wa}]$ 、 $i_a=[i_{ua}, i_{va}, i_{wa}]$ とする。

容量係数行列の対角成分を求める場合は、図10(a)に示すようにひとつの端子のみを測定器のH端子に、他の端子を測定器のL端子に接続する。この場合、モータの三端子電圧 v_a は次のようになる。

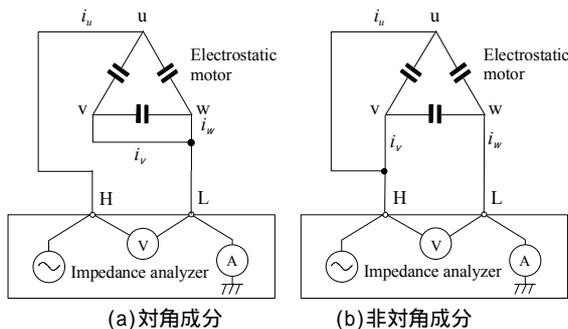


図10 容量係数の測定方法

$$v_a = v_m R^t \tag{8}$$

ただし、 v_m はインピーダンス測定器の電圧印加端子（H端子）の電圧、 R はインピーダンス測定器のH端子に接続する端子を1、それ以外を0で示した行ベクトルである。例えば図10(a)の場合では $R=[1,0,0]$ となる。この時、インピーダンス測定器のL端子に流れる電流 i_m は、 i_a を用いて次式で表せる。

$$i_m = R i_a \tag{9}$$

したがって測定されるインピーダンス Z は、

$$Z = \frac{v_m}{i_m} = \frac{1}{R(j\omega_m C)R^t} \tag{10}$$

となる。ここに ω_m は v_m の角周波数である。図10(a)の結線では、測定されるインピーダンス Z は式(11)となるため、これにより、対角成分 C_{11} の値を得ることができる。

$$Z = \frac{1}{j\omega_m C_{11}} \tag{11}$$

次に、非対角成分を求める場合の結線方法を図10(b)に示す。この場合の R ベクトルは $R=[1,1,0]$ であり、インピーダンスは式(10)より、 C が対称行列であることを考慮して

$$Z = \frac{1}{j\omega(C_{11} + C_{12} + C_{21} + C_{22})} = \frac{1}{j\omega(C_{11} + 2C_{12} + C_{22})} \tag{12}$$

となる。すなわち、図11(b)の結線においては $C_{11} + 2C_{12} + C_{22}$ の値が得られ、すでに求めた対角成分の値を用いて、非対角成分 C_{12} を求めることができる。

測定では、移動子の回転角度を回転ステージによって1/6度ずつ回転させながら測定した。結果を図11に示す。得られた結果から、各容量係数は θ_e に対してフーリエ級数で近似できると考えられ、各成分をFFTによって同定

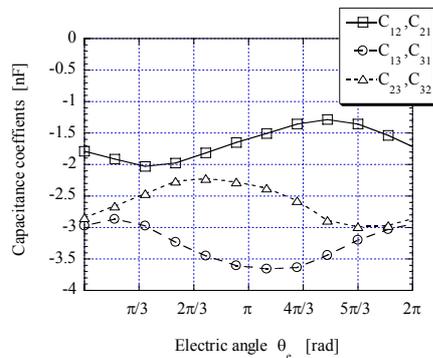
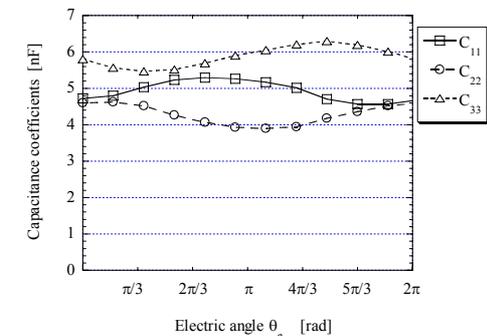


図11 容量係数

した．各成分を以下に示す．単位はnFである．

$$C_{11}=4.94+0.38\cos(\theta_e-2\pi/3)$$

$$C_{22}=4.23+0.37\cos(\theta_e)$$

$$C_{33}=5.88+0.39\cos(\theta_e+2\pi/3)$$

$$C_{12}=C_{21}=-1.65+0.35\cos(\theta_e+2\pi/3)$$

$$C_{13}=C_{31}=-3.27+0.40\cos(\theta_e)$$

$$C_{23}=C_{32}=-2.60+0.39\cos(\theta_e-2\pi/3)$$

結果を式(3)におけるモデルと比較すると、式(3)の C_0, C_1, C_3 の値が完全に同じとなっていない．これはモデルでは三相電極配置が理想的に対称に配置されているとしているが、実際は三相電極は完全に対称ではなく、駆動に寄与しない電極基板上の集合線などによる静電容量などによるものであると考えられる．

・センサ回路

本センサ回路では、入力トランス、出力トランスにスイッチング電源用フェライトコア(PQ40/40コア,TDK製)を用い、入力トランスの1次、2次巻き数を43ターン(約8mH)、出力トランスの1次、2次巻き数を9ターン(約390μH)とした．センサ用の三相交流電圧の周波数は218kHzとした．

図12、図13に、出力トランスからの信号の処理方法を示す．まず、図12に示すように、出力トランスの三相の出力をコンパレータによって矩形波に変換し振幅を規格化する．これらを加算器で加算し、センサ信号の周波数帯のバンドパスフィルタで波形を整え、再びコンパレータによって矩形波に変換する．この矩形波とセンサ用の三相交流電圧のいずれか一つの信号(リファレンス信号)をコンパレータによって矩形波に変換した波形の位相と比較することで移動子の位置を検出する．位相比較器

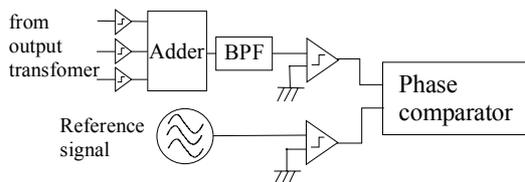


図12 センサ信号とリファレンス信号の矩形波の生成

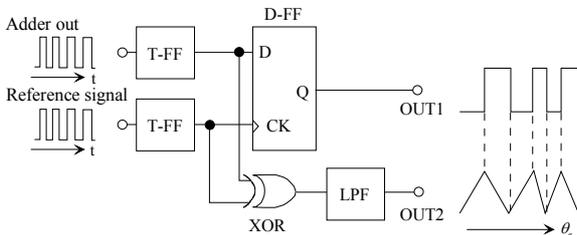


図13 位相比較器

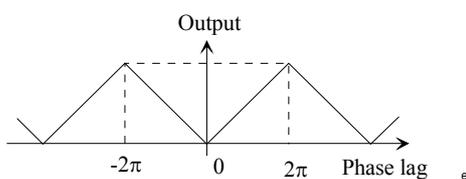


図14 センサの出力信号

13)では、まず、それぞれの信号をT-FFによって2分周することでデューティ比を正確に50%に整える．これは、加算器からの信号に歪があるため、それを矩形波にした信号のデューティ比が正確に50%では無いからである．その後これらの排他的論理和をとり、位相比較を行う．排他的論理和の出力をローパスフィルタ(カットオフ周波数20kHz, 8次)に通した後の信号は、図14のように θ_e の位相が $-2\pi \sim 0$ と、 $0 \sim 2\pi$ で同じ値をとるため、これらを区別するために、D-FFによって二つのパルスの位相関係を検出する．この回路では、センサ信号とリファレンス信号を2分周しているため、出力は θ_e に対して 2π (3ピッチ分の回転)ではなく、 4π (6ピッチ分の回転)毎に繰り返す．このOUT1とOUT2の出力をマイクロコンピュータなどを用いて処理することにより、回転角に対して連続的に出力を得ることができるエンコーダ回路を得ることができる．

5. 実験

5.1 静電クラッチの保持トルク測定

試作したクラッチの保持トルクを測定した．測定方法は、クラッチの回転軸に取り付けたプーリーに紐を巻き、毎秒3.6度の回転速度になるようにXステージを用いて紐を引き、紐の張力を微小荷重ロードセル(LVS-2KA,共和電業)によって測定し、静電クラッチのトルクを得た．測定条件としてクラッチの駆動印加電圧を800V~1600V、変調駆動の搬送波 ω_c を100Hzとした．測定では、クラッチの滑りが生じた瞬間に紐の張力が急激に減少するため、センサ出力は時間に対して、のこぎり状の波形を示す．図15はのこぎり状波形の最大点をサンプルしたもので、静電クラッチの最大保持力を示している．

結果から、本静電クラッチでは、駆動電圧に応じて保持トルクを調整することが可能であり、変調駆動による印加電圧が1600V_{0-p}の時に約16N・cmのトルクを発生することが確認された．また、時間が経過してもトルクが減少することなくほぼ一定に保たれることが確認された．

さらに大きな保持トルクが必要な場合は、移動子・固定子フィルムの積層数を増やすことによって対応可能であると考えられる．

5.1 静電クラッチの回転角度検出

静電クラッチ内蔵型のエンコーダの実験を行った．実験では最初に、静電クラッチの駆動電圧を0Vの状態に、クラッチを手動で回転させた状態での出力を測定した．結果を図16に示す．グラフ横軸は時間、縦軸はセンサ出力を示す．4.2節で述べたように、センサ出力の三角波形の谷から谷の間隔は放射状電極6ピッチ分の角度(=6×0.6度)の回転を示している．本実験では、回転角速度は手動であるため正確には一定ではないが、クラッチを保持しておらず回転が滑らかであるため、瞬間的にはほぼ一定であると考えられる．この仮定のもとに考察すると、センサ出力は回転角度に対してほぼ線形であり、最大誤

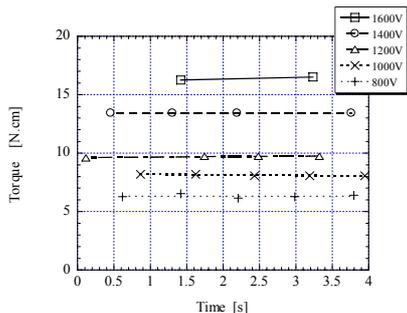


図15 各印加電圧時における保持トルクと時間の関係

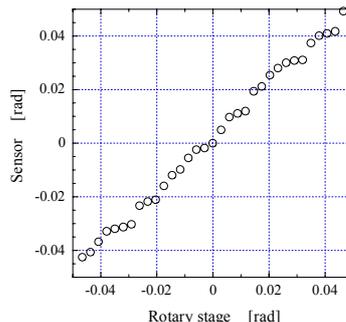


図18 センサ出力（印加電圧1000V時）

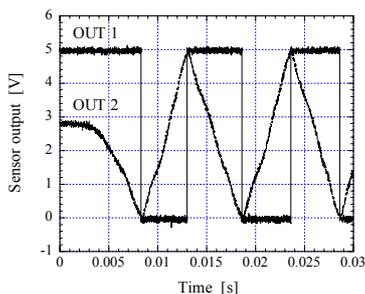


図16 手動回転によるセンサ出力（印加電圧0V時）

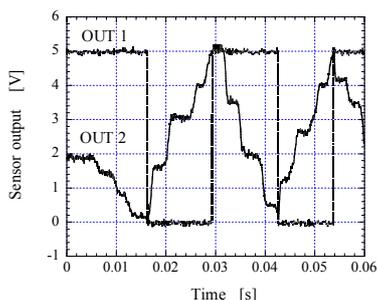


図17 手動回転によるセンサ出力（印加電圧1000V時）

差は約0.23度と見積もることができた。

次に、変調駆動電圧 $1000V_{0-p}$ とし、クラッチを保持した状態(駆動電圧周波数は0Hz、変調波の周波数を100Hz)で、手動で静電クラッチを脱調させた場合のセンサ出力を図17に示す。回転動作は、停止と滑りが小刻みに起きるため、出力は駆動電圧がゼロの場合と比べて直線的でないことが確認できる。この状態でのセンサ性能を調べるために、同一駆動電圧条件で、静電クラッチの回転軸を回転ステージのダイヤルゲージによって1/6度(0.0029 rad)ずつ回転させながらセンサ出力を測定した。図18に回転ステージの読みに対するセンサ出力の関係を示す。横軸に回転ステージによる回転角、縦軸にセンサ出力から回転角度を計算した値を示す。センサ出力は回転ステージの読みに対し、最大誤差は約0.28度となった。

6. まとめ

回転型の静電モータを用いて、静電クラッチとして機能させることを提案した。静電クラッチの駆動用電極をセンサ用電極として併用する内蔵型位置センサについて

述べ、試作した静電クラッチの性能を評価した。実験では、静電クラッチの保持トルクを印加電圧によって調整することが可能であり、1600Vの変調駆動電圧時に約16N・cmの保持トルクが得られた。内蔵型位置センサは、静電クラッチの回転角度を検出可能であることが確認され、1000Vの印加電圧で保持した状態で脱調した時の角度検出では、回転ステージの読みに対して最大誤差が約0.28度となった。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、機械設備購入のために補助金を頂いた日本自転車振興会に深く感謝いたします。

文 献

- [1] 森田寿郎, 鈴木雄一郎, 川崎毅彦, 菅野重樹: 人間共存ロボットマニピュレータの衝突安全設計と制御, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.1, pp.102-109(1998)
- [2] 森田寿郎, 菅野重樹: メカニカルインピーダンス調節機構による関節制御 - 機構の提案とロボット指への適用 -, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.1, pp.131-136(1996)
- [3] 新野俊樹, 樋口俊郎, 柄川索: 交流駆動両電極形静電モータ, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.1, pp.97-102, (1997)
- [4] A.Yamamoto, T.Niino, T.Higuchi: Servo Control of High-Power Electrostatic Linear Motor, Proc. ICMT'99, pp.274-279, 1999
- [5] A.Yamamoto, T.Niino, T.Ban, T.Higuchi: Performance Improvement of Electrostatic Actuators by Skewing Electrodes, Proc. IEEE IAS 31st Annual meeting, pp.1980-1985(1996)
- [6] 新野俊樹, 山本晃生, 樋口俊郎: 交流駆動両電極形静電モータの変調駆動, 電気学会論文誌, Vol.11, No.11, pp.1287-1291(1998)
- [7] A.Yamamoto, H.Yasui, T.Nishijima, T.Higuchi: Electrostatic Linear Servo Motor with Built-in Position Sensor for Vacuum Environment, Proc. ISIS'2003 CDROM(2003)

案内ロボットの開発

西嶋 隆 山田 俊郎 小川 行宏 今井 智彦 稲葉 昭夫 大野 尚則

Development of a Guide Robot

Takashi NISHIJIMA Toshio YAMADA Yukihiro OGAWA Tomohiko IMAI Akio INABA
Naonori OHNO

あらかし 民生用ロボットの先行用途開発として案内ロボットの開発を行い、JR岐阜駅内にある商業施設のActive-Gにて公開運用実験を実施した。この案内ロボットは車輪型の移動ロボットであり、施設内の決められた経路を自走し、店舗の前で音声によって店舗紹介を行う。本研究では、軽便に設置・撤去可能な移動ロボットシステムの構築、および、ロボットの安全性確保のためのロボット構造の提案をする。また、開発した本移動案内ロボットの公開運用実験の結果について述べる。試作した移動ロボットシステムは主に、RFIDとレーザレンジファインダを用いた移動制御手法を用いており、環境に対しては大掛かりな設備を導入することなく、RFIDタグを数メートル間隔で床面に貼り付けるのみで設置可能である。ロボット外装は安全性を考慮し、障害物との干渉を少なくするために滑らかな釣鐘形状とし、衝突時には外装全体が揺動することによって全方位からの衝突を検知可能な機構を装備した。公開運用実験では、提案する移動制御手法により安定してロボットが自走可能であることを確認した。

キーワード 民生用ロボット、案内ロボット、RFID

1. 緒言

近い将来における、民生用ロボットの福祉、介護、サービス分野等での市場を見据え、岐阜県では平成12年度から「ギフ・ロボットプロジェクト21」を推進している。このプロジェクトではロボットテクノロジーに関する技術開発・研究を通じて、民生用ロボット分野における新産業の創成、地場産業の高度化を目指している^[1]。

現在、民生用ロボットの具体的な先行用途開発が重要であり^[2]、本年度は、店舗紹介を行う案内ロボットを開発し、JR岐阜駅構内の商業施設であるACTIVE-Gにおいて公開運用実験を行った。

この案内ロボットは車輪型の移動ロボットであり、発話・BGM演奏機能を有し、施設内の決められた経路を巡回しながら店舗案内を行う。実験室のような整備された（整備可能な）環境ではなく、不特定多数の人々が往来する一般的な環境において、ロボットを安全に安定して自走させるためには、環境に大掛かりな設備を導入することなく、環境の変化に対して安定して動作可能な、安全性の高い移動ロボットシステムの開発が望まれる。

本報告では、RFID、レーザレンジファインダ等を用いた、簡便に設置・撤去が可能な移動ロボットシステムの提案、および、安全性を確保するためのロボット構造の提案を行う。また、開発した案内ロボットによる公開運用実験で得られた知見について述べる。

2. ロボットの構成

2.1 外装

今回開発したロボットの外観を図1に示す。高さ1100mm、直径800mm(足元)、重量約50kgである。素材は機械的強度を重視し、FRP樹脂製とした。釣鐘型の形状は、全体に丸みがあり親しみやすい形状であるとともに、回転体であるため周囲に突起物がなく、回転時の巻き込みを防ぐことができる。外装は、頭部と胴体部の2つの部分からなり、胴体部の四方にはロボット内部の音声スピーカの音響を考慮し、通気孔を設けた。頭部は回転運動が可能で、愛嬌を振りまく演出を行うための首振り機能を有している。ロボットの頭上には、緊急停止ボタンを装備し、緊急時は速やかに押すことができる。



図1 ロボットの全体写真



図2 台車前方の写真



図5 首部分の機構



図3 台車後方の写真

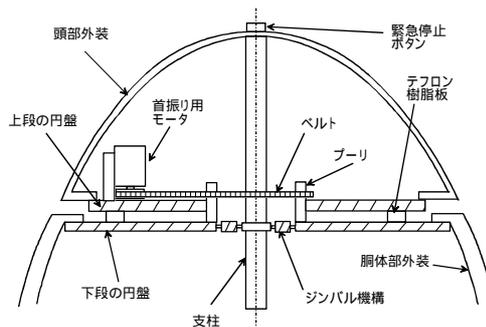


図6 首部分の模式図



図4 音声発話機能の出力装置（スピーカ）

2.2 台車機構

台車の車輪前方の周辺部写真を図2に示す。台車（Pioneer2-DX8, ActivMedia Robotics製）の電源には24V鉛蓄電池を2個使用し、使用状況にもよるが、連続で数時間の駆動が可能である。台車前方には、レーザレンジセンサ（LMS 200, ジック株式会社製）を搭載し、前方180度の範囲を1度間隔で周囲の物体までの距離を測長することが可能である。測長のサンプリングは180度の間を0.25秒で行った。台車底面には、RFIDタグ検出用のアンテナ（Alien Technolog製）を装備し、台車真下にあるRFIDタグを非接触で検出することができる。図3は、台車の左後方からの写真を示す。台車周囲の8方向には、板ばね材のリボンリング形にしたバネを装備し、リング内部には、ダンピング用に発泡クッション材を挿入している。このバネ材は、胴体部の外装を載せた時に、外装の内側と接触して外装を支える機構となる。このバネ材の横には、リミットスイッチが設置されており、ロボットの衝突センサとして機能する。台車後方には超音波センサを6個装備し、後方の障害物検知を行う。また、音声発話機能の出力装置として、2台のスピーカを装備している（図4）。

2.3 首振り機構

図5は、ロボットの首部分の構造写真を示す。同図中の円盤は上段と下段の2枚の円盤で構成されている。図6にその断面模式図を示す。下段の大きい円盤の縁には、胴体部分の外装を掛けるように載せ、上段の円盤には、頭部の外装を載せる。頭部の首振り機構として、上段の円盤は下段の円盤に対し、プーリとベルト機構によって回転する。上下の円盤の間には潤滑のため、テフロン加工されたプラスチック板を挿入した。さらに、この首部分はジンバル機構を用い、両円盤はロボット台車から垂直に立てられた支柱に対して、全方位に傾くことができる。このような構造にすることにより、胴体部分に障害物が接触した場合、ジンバル機構に取りつけられた胴体部が揺動し、2.2節で説明した外装内壁に接触しているリング状のバネ材を押すことによって、衝突センサ（リミットスイッチ）が作動する。すなわち、このジンバル機構によって、胴体部分の全方位からの衝突を感知することが可能である。

2.4 システム構成

図7にシステム構成のブロック図を示す。本システムでは、ロボット底面に設置したRFID受信機によって、環境の床面に設置されたRFIDタグのID番号を識別する。RFIDタグのID番号をもとに、ロボット内部にあるデータベースから、登録された行動列を行動指示部から逐次実行する。実行する内容は、ロボットの移動に関しては、自律行動部に命令が伝わる。そのほかに、ロボットの発話およびBGM演奏命令であれば音響部に、ロボットの首振り命令であれば、首動作部に命令が伝わる。

自律行動部に対しては、ロボットの停止、前進、後退、回転、自己位置補正の命令があり、それぞれの行動中は、

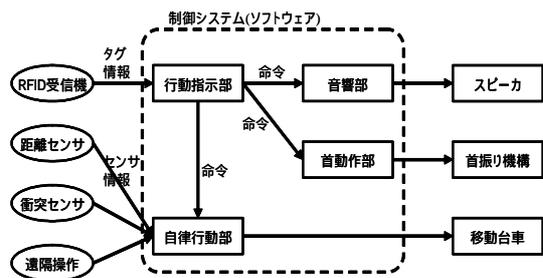


図7 システム構成

レーザレンジファインダ, 超音波センサ, 衝突センサの情報を用いて行動を生成する。さらに, 遠隔操作機能を付加し, 無線LAN経由で外部端末から操作可能である。

3. ロボットの移動制御

自律移動型ロボットの制御手法として, ロボット内部に保持している環境のマップと周辺画像のマッチングによって, ナビゲーションを行う方法^[3]などの様々な研究がなされているが, 今回は, より簡易な方法として, RFIDとロボットに搭載したレーザレンジファインダを用い, 設置・撤去が簡便なナビゲーションシステムを開発した。

3.1 RFIDの運用・設置方法

今回利用したRFIDタグは, 2.4GHz帯, 24bitの記憶容量を持つパッシブ型である。RFIDタグは環境の床面に貼り付け, ロボットはRFIDタグの上を通過するときに, そのRFIDタグの固有識別番号を非接触で取得する。パッシブ型のRFIDタグであるため, RFIDタグは電源不要, 薄型である。

RFIDタグは人の往来のある通路の床面に貼り付けることから, 耐久性を考慮した加工を施した。RFIDタグの中央部分にあるIC部分には樹脂製のクッション材を貼り, その上から, 床面に対して色合いを目立たなくするためにカラー印刷した紙を貼り付け, さらに表面には防水のために透明なプラスチックフィルムを積層した。耐久性加工を施したRFIDタグの厚さは最大で約1mmである。外観を図8に示す。

床面へのRFIDタグの配置方法は, ロボットの経路に対して垂直方向に数枚のタグを並べて設置する。これはロボットの移動に多少の誤差が生じて, いずれかのタグを検出できるようにするためである。この数枚のRFIDタグはそれぞれが固有の識別番号を持っているが, これらを一つのグループとして管理し, 各グループに対して動作命令列を定義する。すなわち, ロボット内部では, RFIDタグの固有識別番号に対するグループの管理, 及び, 各グループに対する動作命令列の管理を行うデータベースを持つ。このデータベースはテキストで記述されている。このように運用することによって, RFIDタグの追加, 削除, 交換の際にはデータベースを一部変更するのみで対応可能であり, メンテナンス性に優れている。

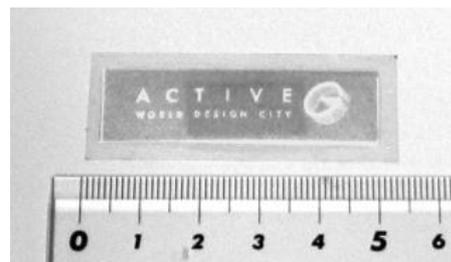


図8 耐久性加工と色合いを施したRFIDタグ

3.2 RFIDとレーザレンジファインダによる移動ロボットのナビゲーション

ロボットに搭載した車軸のエンコーダやジャイロなどの内界センサのみで, 環境内での正確な位置や角度を検出することは, センサ誤差の蓄積などから一般的に困難であり, 何らかの手段を用いて, 環境のグローバルな座標におけるロボットの位置・角度情報を得る必要がある。

RFIDを用いた場合, グループ化したRFIDタグを基準となる位置に設置することによって, グローバルな座標におけるおおよその位置を得ることができる。しかしながら, 今回の場合, 前節で述べたように, RFIDタグは基準位置に, ロボットの移動誤差を吸収するために並べて数枚貼られているため, 正確な位置を得ることはできない。さらに, RFIDの情報のみでは, ロボットの経路に対する回転角度の情報を得ることが困難である。そこで, 本手法ではRFIDの基準位置の周辺にある壁の直線を検出し, それをランドマークとしてロボットの位置・角度を目標の位置・角度に補正する。

ロボットの位置・角度を補正するためのRFIDタグを貼る基準位置は, その周辺に動かすことのできない壁などの直線部分のある場所に予め設定する。ロボットが基準位置のRFIDタグ上に到達したとき, レーザレンジファインダを用いて指定された方向・距離の範囲に存在する壁などの直線情報検出する。検出にはハフ変換を用いた。次のシーケンスは, 図9における位置・角度補正の例である。

- 1, 直進中にあるグループのRFIDタグを検出 (図9左)
 - 2, 停止し, 前方 (壁の法線がロボットに対して左右45度以内) でかつ, ロボットからの距離が1m~2mの範囲にある直線 (壁) を検出。(図9中央)
 - 3, 検出した直線に対し, ロボット中央からの距離1mに移動し, 壁の法線方向とロボットの左90度方向と一致するように回転し, その後直進する。(図9右)
- これは一例であるが, 適宜, このような動作を行いな

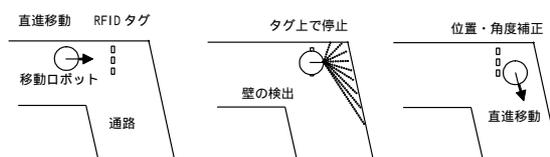


図9 位置補正のシーケンス

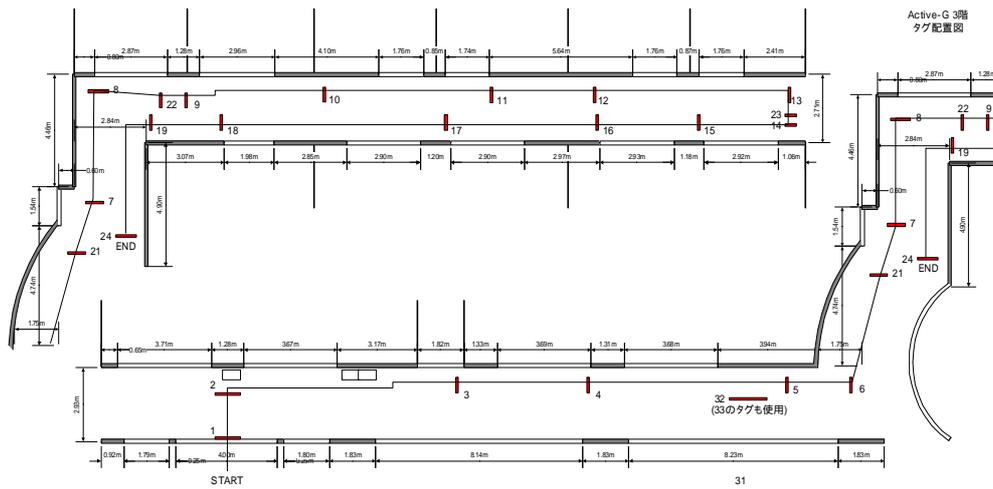


図10 実験フィールドの地図

がら、ロボットは自己位置・角度を補正し、環境内を移動する。なお、直進中に周囲に壁がある場所では、常に周辺の壁を認識し、例えば左壁に沿って移動することも可能である。その際は、壁までの距離・角度が設定した閾値を越えた場合、適宜補正動作を行う。これらの補正に用いるパラメータはすべて行動命令列のデータベースに記述する。また、ロボットの直進時に前方の矩形領域に障害物を検知した場合には、一時停止し、しばらく待ち、障害物がなくならない場合は発話機能を用いて注意を喚起する。例えば、経路上の人が障害物として認識されている場合は、人に経路を開けてもらえることを期待してロボットが発話する。もし、障害物がなくならない場合は簡単な回避行動を行う。

4. 公開運用実験

4.1 公開運用実験フィールド

案内ロボットの公開運用を岐阜駅構内にある商業施設のACTIVE-G 3階に設定した。公開運用実験前にはRFIDタグの耐久性を調べるために、予め同フィールドに耐久性加工を施したRFIDタグを20枚設置し、2週間に渡り、タグが剥がれたり損傷しないことを確認した。実験フィールドの地図を図10に示す。同図は、紙面の都合上、右下と左上に分割して表示している。設置したタグのグループは38グループで合計約100枚のRFIDタグを設置した。タグは主にロボット位置・姿勢補正を行うポイント、店舗案内を行う場所近辺に設置し、それぞれのグループの間隔はおよそ5～7m程度である。今回の移動手法では、RFIDタグを厳密な位置に貼る必要性がなく、シール状であるため設置・撤去作業が容易であった。

4.2 実験フィールドにおける障害物回避方法

移動経路は図10に示すように基本的に通路の左側を通行することとした。このような規則を設けることで、障害物回避を行う際のルールを単純化することができる。障害物の回避は、ロボットが障害物を検知し、しばらく



図11 公開運用実験の様子

停止し、その後、発話機能を用いて注意喚起を行っても障害物がなくならない場合に実行される。

今回は、通路の中央部には人以外の障害はないという前提の下で回避動作を設定した。回避動作はロボットの右方向に避け、廊下の中央付近を通過し、その後、再び左側通行をするように、左壁の方向に戻ることにした。この移動中は、車輪のエンコーダによって自己位置を計算する。回避行動等で生じる位置・角度誤差は、再び、基準位置に設置されたRFIDタグの位置・角度補正によって解消される。

4.3 実験

平成16年7月9日から19日までの10日間、Active-G 3階で公開実験を行った。公開運用実験の様子を図11に示す。

公開運用中は通路に置かれる看板等の位置や数によって異なっていたが、これらをうまく避け、一般来場者の往来もある中、決められた周回コースを約30分で巡回することが確認できた。歩行者がロボットの直前を横切ることもあったが、ロボットは自動的に停止し、人や物への衝突事故はなかった。RFIDタグの設置・撤去作業も容易であった。行動命令に関するデータベースのパラメータ調整は現場で行う必要があり、この点は公開運用前に試験しながら設定する必要があったが、作業内容はデータベースのパラメータ調整であり、軽便に設置でき

たといえる。次に公開運用実験において得られた知見について列挙する。

1. ロボットの音響・発話機能について

ロボットの移動中、ロボットからのBGM演奏、発話は周囲の人の注目を得るためには効果的であり、ロボットとの接触事故を避けるためにも有効であると考えられた。ロボットの動作中は絶えず何らかのBGMや音声を出力するとよい。発話による演出では、すぐに人を飽きさせないような工夫が必要であり、この点は人の心理的な観点から検討する必要があると考えられる。また、発話による店舗などの宣伝効果も期待できる。

2. ロボットの移動方向について

ロボット周囲にいる人が、ロボットが次にどの方向に移動するか予測しやすくすることが、接触事故を防ぐためには重要である。ロボットが突然斜め方向に直進したり、後退することは、不特定多数の人がいる中ではすべきではないと考えられた。今回、ロボットの移動は基本的に前進（直進）と回転のみであるため（後退は遠隔操作時のみ）、周囲の人はロボットの正面を外観から認識できるため、自然にロボットの動きを予測できたと考えられる。ロボットの回転はほぼロボットの中央を中心に回転するため、ロボット外装が回転体であることから、ロボットの占有空間に大きな変化がなく、安全であったといえる。

3. ロボットの緊急停止ボタンについて

ロボット頭上に装備した緊急停止ボタンは、来客者によって故意に押されることがあった。ロボットの設計では安全性を考慮し、最も押しやすい位置に緊急停止ボタンを設置したが、このように故意に押されることを想定していなかったことから、人の行動を考慮したスイッチなどのインターフェース設計が必要である。

4. ロボットの安全基準について

実験中は安全を最優先し、常にオペレータがロボットを監視し、遠隔操作によって割り込み操作が可能な状態で行った。ロボットを運用する時に監視が常に必要であ

ることは実用上問題である。現段階では、不特定多数の人の中で民生用ロボットを運用するための安全基準の設定が課題である。すなわち、人と接する環境において自動で動作する民生用ロボットに必要とされる安全性に関するガイドラインが策定されることによって、事故の責任問題を解決することができ、民生用ロボットが広く社会で人の役に立つ機械として利用できるようになると考えられる。

5. 結言

民生用ロボットの先行用途として、案内ロボットを開発し、公開運用実験を行った。安全性を考慮したロボット構造について提案・試作し、一般の環境で設置・撤去が容易で、環境の変化に強い、移動ロボットシステムをRFIDやレーザレンジセンサを用いて開発した。

公開運用実験では、安全に安定して移動ロボットを運用できることを確認した。さらに、ロボットを一般の環境下で用いる場合に、人の行動を考慮したロボットの移動方法やインターフェース設計、安全基準の設定が重要であるという知見を得た。

また、本移動ロボットのナビゲーション方法は、設置・撤去が簡便であることから、期間が限定されたイベントや工場内でフレキシブルに移動経路を変更する用途においても利用可能であると考えられる。

文 献

- [1] 稲葉昭夫, 千原健司: ギフ・ロボット・プロジェクト 2-1, 日本ロボット学会誌, Vol.22, No.7, pp.4-7(2004)
- [2] 新産業創造戦略, 経済産業省, (2004)
- [3] 辻安彦, 八木康史, 谷内田正彦: 全方位視覚センサを用いたロバストな環境マップ生成と自己位置推定, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.1, pp59-67(2001)

岐阜県生産情報技術研究所研究報告 第6号 平成16年度

発行 平成17年7月30日

編集発行所 岐阜県生産情報技術研究所
岐阜県各務原市須衛町4-179-19

TEL:0583-79-3300

FAX:0583-79-3301

<http://www.rd.pref.gifu.jp/~imit/>
