

論文

バルーンロボットの開発

島田 茂伸*¹⁾ 益田 俊樹*²⁾ 森田 裕介*²⁾ 小林 祐介*³⁾ 後濱 龍太*¹⁾
 佐々木 智典*²⁾ 横澤 毅*³⁾ 新井 宏章*⁴⁾ 入月 康晴*⁵⁾

Development of balloon robot

Shigenobu Shimada*¹⁾, Toshiki Masuda*²⁾, Yusuke Morita*²⁾, Yusuke Kobayashi*³⁾, Ryuta Atohama*¹⁾,
 Akinori Sasaki*²⁾, Takeshi Yokosawa*³⁾, Hiroaki Arai*⁴⁾, Yasuharu Irizuki*⁵⁾

A new service-robot combining a lightweight body and a joint driving function using the shape memory alloy-wire is proposed. The body of the robot is made of a balloon containing helium gas. We show a new service-robot that has the human safety function and can carry out the guidance-service.

キーワード：サービスロボット, バルーン, 軽量, 対人安全性, 案内

Keywords : Service-robot, Balloon, Lightweight, Fail-safe, Guidance

1. はじめに

少子高齢化, 高齢層と生産年齢層の逆転, 安全・安心な社会の実現, 便利でゆとりある生活のために, ロボットが生活, 公共の場でより身近な存在として役立つことが期待されている。これらロボットは従前の産業用ロボットと切り分けられサービスロボットと呼ばれる。サービスロボットの市場は掃除ロボットと手術ロボットが拡大基調ではあるものの, 社会要請に反して実用化の事例が少ないのが現状である。その一要因として安全規格が存在しないことが挙げられる。ゆえに企業は過大な責任を恐れてロボット市場への参入はせず, いつまでも使用実績は蓄積されないまま改善材料不足となりユーザフィードバックが得られない。したがって企業はますます敬遠することとなり, ロボット産業への参入動向は所謂, 負のフィードバックが継続している。国策によってサービスロボットの安全規格制定が進められているが, 規格とはそもそも事故時の責任範囲を規定するものであることから日本社会に馴染まないといった批判がある。ハードウェア的に安全性を確保する試みとして, ロボット知能化を基盤とした機能安全の開発も進められているが, 複雑すぎる現実世界ではソフトウェアとして記述しきれず, やはり事故の可能性を有している。一方で無事故は不可能であるので, 現在提案されているサービスロボットに比して事故リスクを低減することができれば負の連鎖のブレークスルーになるであろう。ここでロボット

を軽量化することを考える。機械形状の検討やモータサイズの適切化程度ではなく, ロボットが浮力を有するほどの軽量化である。ロボットは浮いていることを想定すればこのロボットと衝突しても被害は皆無, あるいは軽微であることが予想できる。重量物の可搬や移動架台としての使用は不可能にはなるが, サービスロボットのタスクとしてしばしば取り上げられる「案内」, 「見守り」, 「警備」に関して, 重量は不要と考えられ, ヒトとの距離が近い, あるいは接触が必然となる上記3タスクでは軽量であることがむしろ望ましい。軽量かつ柔軟な材料でロボットを製作し, 圧縮空気のみで駆動させるインフレイタブル構造と呼ばれる研究が盛んになってきている。川村ら⁽¹⁾はマニピュレータをPPで構成することで軽量化し, 対人安全性と省エネルギー化を向上させる試みを先行的に研究している。Otherlab社⁽²⁾⁽³⁾ではインフレイタブル構造を基盤に, ヒト移乗支援を行うマニピュレータやヒトの手を模したハンド, 及びヒトが搭乗可能な4足歩行ロボットを研究開発している。ヒトと接触する用途にフォーカスしており安全性についての優位性が主張されている。iRobot社⁽⁴⁾はインフレイタブル構造を用いて軍用途のロボットハンドを研究開発している。未舗装の過酷な走行環境における振動や衝撃や高温高湿度雰囲気下では, ロボットに搭載された機械ハンドはタスク実行地点への移動で損傷の恐れがある。当該構造の堅牢性と柔軟であることから折り畳んで小さく格納できる高可搬性を主張している。上記3件の目的は異なるものの, 共通して軽量で柔軟物ゆえの安全性を主張している。なお, 上記3件のテーマはインフレイタブル構造ゆえに圧縮空気を安定的に供給するエアコンプレッサを必要とする。本件はヘリウム内包でエアコンプレッサが不要であることが異なり独

事業名 平成24年度 基盤研究

*1) 生活技術開発セクター

*2) ロボット開発セクター

*3) 機械技術グループ

*4) 電子半導体技術グループ

*5) 情報技術グループ

自性を有している。

本研究ではヒトと衝突しても事故にならないことを本質的な対人安全性と定義し、これを実現するサービスロボットを開発することが研究目的である。そのためにバルーンにヘリウムを充填することで浮力を有するロボット本体を製作する。ロボットの推力や運動は、本体同様にバルーンの脚状部品、あるいはヒレ状部品を製作し、形状記憶合金ワイヤで伸縮させることにより得る。開発ロボットの具体的なアプリケーションを案内サービスと定め、そのシナリオを以下のように設定する。(1) ロボット待機、(2) ユーザの手招きを認識しロボットがサービスを開始する、(3) ロボットがユーザに近づく、(4) ユーザを先導し目的地までの経路を案内する。この計画の基、要素技術として形状記憶合金ワイヤによる関節駆動機構と重心移動機構の研究開発を行う。また案内シナリオを実行するための要素技術として、ユーザの手招きを認識する画像処理の研究開発を行う。得られた各要素技術のシステムインテグレーションを行い、まずは案内シナリオを直線状 AB 点間に設定し、構成したバルーンロボットで基礎的な実験と動作確認を行う。

2. バルーン材料と形状の検討

従前の機械構造物であるロボットでは、意匠性が高く、親しみやすい外観を作ることは困難であった。すなわち強度や構成機材スペース、及び加工難易度のトレードオフによる最適設計自体が困難である上に、意匠性の装飾を加えた結果、全体重量が増加すればアクチュエータのグレードアップを含む再設計が要求されるからである。本研究のロボット本体はバルーンを使用することから上記条件に拘束されず、製作者の意図を反映した形状製作が容易であることが特徴の一つである。この特徴を踏まえ、バルーン材料の選定から始める。

2.1 バルーン材料の選定 選定条件として複雑形状の製作が可能で、着色や接着による装飾可能な材料が望ましい。加えて、軽量なもの、安価で安定供給されるもの、SMA ワイヤの自己発熱により融解しないもの、ヘリウムガスに対する高ガスバリア性能を有するものを選定する必要がある。アルミ蒸着シート、透明蒸着シート、EVOH シート、ポリ塩ビシートの 4 種類の材料を候補とし、比重、断熱性、コスト、環境、供給体制の項目をカタログ値から調査した。また、ガスバリア性、耐久性に関しては、各材料を切り出し、コテによる熱溶着でバルーンを製作し、ヘリウムガス充填の上、実験室に放置して経過観察実験を行った。結果を表 1 に示す。

表から塩ビを除いた 3 種の材料を比較すると、ガスバリア性能と比重は同程度の性能を有している。かつ断熱性能も考慮すると EVOH が最も性能が良い。しかしながら EVOH は高価かつ入手が困難である。研究の初期段階では複数回の試作・実験が予想されることから安価で十分に流通しているアルミ蒸着シートをロボットの要素技術開発用材料と選定した。断熱性については SMA ワイヤがシートに接触す

表 1. バルーン材料の検討

	アルミ蒸着	透明蒸着	EVOH	塩ビ
ガスバリア	○	○	△	×
比重	○	○	○	×
耐久性	△	×	△	×
断熱性	×	△	○	○
コスト	○	△	×	○
環境	×	△	○	○
供給体制	△	×	×	○

る微小箇所に断熱材を貼ることで解決を図る。一方、要素技術を統合したロボットシステムとしての試作では塩ビを用いる。その理由は断熱性、コスト、環境対策、供給体制について優秀であり、中小企業への技術移転が容易であることが挙げられる。ガスバリアの低性能はガスの再充填を、大比重は大容積のロボット筐体を、耐久性については都度修理する。

3. ロボット関節のアクチュエータとその特性

現在、提案されているロボット関節のほとんどがモータ駆動である。玩具用の小型軽量モータが存在するが、付属装置としてのギヤボックスやドライブが必須であること、1 関節につき 1 アクチュエータが必要であることから重量増大が予想できた。また、モータ本体に重量が集中することは、ロボット上部に関節を装備した際の不具合が予見できた。つまり、バルーンは空中で拘束されていないから重量物は重力方向に向かい、必ず上下反転する。これを抑制するためにはバルーン下部におもりを搭載しバランス調整が必要であることから軽量故のバルーンロボットの価値を減少させる。二足歩行型や蛇型、及び魚型ロボットへ応用し複雑化した場合、それらバランス調整が困難になることが考えられる。したがってロボットの関節駆動には軽量の SMA ワイヤを用いる。これは筋肉のように各組織がアクチュエータとなっている直径 0.05~0.15 mm のワイヤである。重量は 1 m で 112 mg と軽量であり、その重量に偏りはない。ロボットに装備した際、全体のバランス調整が必要になっても極軽量のおもり付与で解決されると考える。以下では使用した SMA ワイヤについて述べる。

3.1 SMA ワイヤ SMA ワイヤには BioMetal (トキ・コーポレーション株式会社製) を使用した。これは Ti-Ni 系形状記憶合金を原料にした繊維状のアクチュエータであり、この繊維自体がメカニズムとなり繰返し運動に安定な強い異方性を示す。したがって一般的な SMA に比して制御が容易であると言える。本製品は電気回路的には一種の抵抗であり、通電することによってジュール熱が発生する。その熱によって収縮する方向へと組織変態が生じ、力を発生させる。製品には 2 種類が用意されており、それぞれ BMF (BioMetal Fiber) と BMX (BioMetal Helix) との製品名で販売されている。BMF は Fiber の名の通り線状でありその直径は 0.05~0.15 mm である。直径によって 18~150 gf のおもりを駆動する力を発揮する。大電流を流して断続的

に加熱すると高速で収縮可能であるが、伸張速度は冷却速度に依存するため強制冷却を行わないと高速伸張はできない。変位量は自然長の4%以上であり、仮に1mの線長として40mmの変位が取り出せる。BMXはBMFをコイル状に加工した製品であり、そのコイル径は0.2~0.62mmである。電話器の受話器コードを想像するとそれに近い。基本特性はBMFに準ずるがコイル状であることから、BMFと同じ長さのBMXでは線長を長くでき変位が拡大されている。欠点として、線長が長いと通電による加熱に時間がかかり収縮速度が遅い、かつ同じ理由によって自然放冷に時間がかかり伸張に時間がかかる。本研究では高速収縮、大出力のBMFを関節駆動機構に用い、大変位であるBMXを重心移動機構に用いる。

3.2 SMAワイヤを用いたロボットの駆動手法 三次元空間の浮遊物体の位置姿勢を制御するものに飛行船がある。この位置姿勢制御には作用力ベクトルが可変であるプロペラが用いられることが多い。アクチュエータが統合できスマートである反面、複雑機構が必要であり重量物となる。本研究では軽量を優先し、本ロボット特有の駆体制御方式である関節駆動手法と重心移動手法を提案する。関節駆動方式は軽量のロボット部品をSMAワイヤで繋ぎ駆動させることで脚型、あるいは魚様のヒレ型のアクチュエータを構成し推進力を発生させることを想定している。また重心移動手法はロボットに装備されたおもりを移動させることによってロボット全体の重心を変化させ姿勢を制御する手法である。またこれらそれぞれはインタフェースにも使用可能である。つまり、ロボットが案内サービスを実施する際、ユーザが命令し何の反応もしなければユーザは故障していると考えるか、命令を受け付けているにもかかわらず何度か同じ命令を繰り返す。フィードバックには音声で簡単であり利用頻度も高いが、親しみやすい外観を持つ本研究のロボットではユーモラスで特徴的なインタフェースを志向し、ロボットの運動によって命令受信状態をフィードバックすることを考えた。ヒトのコミュニケーションにおいても「うなずき」「手振りを加える」等のボディランゲージは重要な技巧であり、ただ話している場合よりも感情が伝わり親しみを感じることもある。関節駆動機構の想定環境として、ユーザを見つけた場合や目的地に到着した場合、及び情報提供のための注意勧告をする場合に、関節を駆動させ、ユーザに「腕がパタパタと動いた」との感情を抱かせる。重心移動機構のインタフェース利用としては、重心の移動によって全体の姿勢の移動を伴わないその場で変化させることが可能であるから、例えばヒト型のバルーンがピッチ方向に姿勢変化すれば「うなずき」、ヨー方向に姿勢変化すれば「イヤイヤ」に見え、「Yes」、「No」の意味表現が可能であると考えた。

以下ではまず関節駆動機構から説明を行う。

3.3 関節駆動機構 動作原理を図1に試作を図2に示す。図2左図にあるようにBMFをアーチ状に曲げ、アーチの根本を端子に、アーチの先端を2枚のPP板で挟み込み接

着した。板と端子の間にはBMFだけで結合される隙間が設けられている。非通電時に端子台を水平方向に設置すると、BMFが柔らかいため板が重力方向に垂れ下がる。よって端子台と板との位置関係は直角である。通電時にはBMFが発熱・硬化することで直線状になる。したがってその先端の板は水平方向に持ち上げられる。以上が動作原理である。基礎実験では3Hzでの動作を確認している。

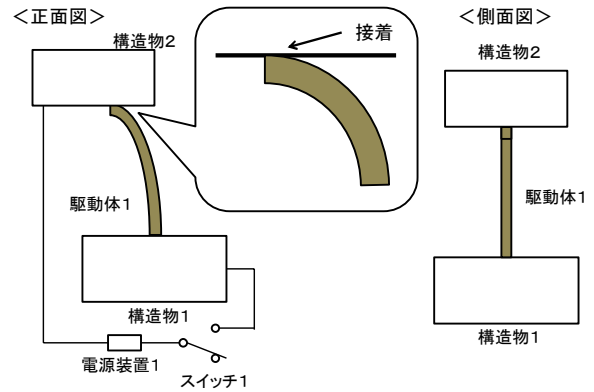


図1. 関節駆動機構動作原理

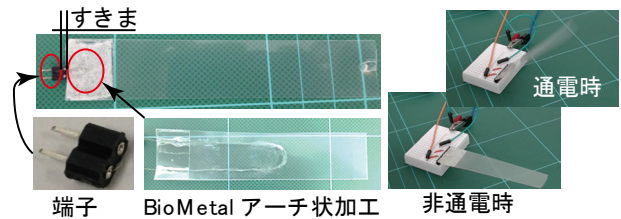


図2. 関節駆動機構試作

3.4 重心移動機構 試作を図3に示す。二つの支点とその中間点におもりを配置し、A支点とおもりをBMXで接続した(A区間とする)。B支点とおもりとはゴムによって接続する(B区間とする)。A区間に通電するとA区間のBMXが収縮し、おもりがA支점에近づきバルーン全体の重心がA支点よりになる。バルーンは浮遊しており無拘束であるから重心移動に伴い自らの姿勢を変化させる。A区間を非通電にするとBMXが自己発熱を停止し雰囲気温度で冷却されB支点方向へと伸縮する。伸縮時には力を生じないが、B支点からのゴム張力によっておもりは初期位置に戻

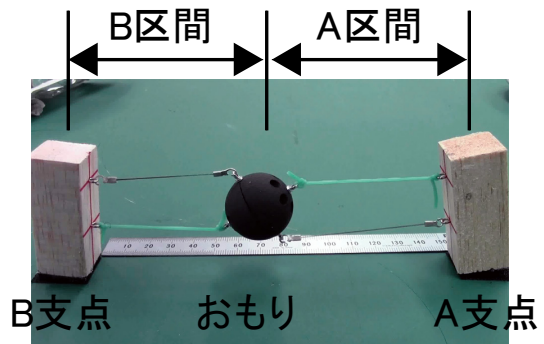


図3. 重心移動機構

る。したがって、バルーンは再度姿勢変化を行い初期姿勢へと復元する。浮力 180g を有するバルーンに当該装置を装備し基礎実験を行った。図 4 に姿勢変化の様子を示す。A 区間の通電によりおもりが右方向へと移動する。したがってバルーンの重心は右側に移動したことになり全体の重量バランス整合性により姿勢変化が生じ、時計方向に 90 度回転した。A 区間を非通電にすると、A 区間は伸張を始め、B 支点からのゴム張力により初期位置に復元し、その効果としてバルーンは初期姿勢に復元する。バルーンに偏心した円盤を装備し、その円盤をモータで駆動することによっても同様の効果が得られる。図 5 に円盤方式による重心移動機構の概念図を示す。更に軽量型として円盤の半径を棒状部品に、円盤の偏心をおもりに置き換えても同様にバルーンの姿勢変化を生じさせる。軽量型として RC サーボモータを用いた試作を図 6 に示す。

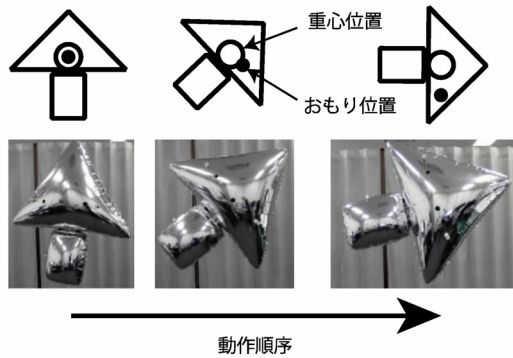


図 4. 重心移動機構試作

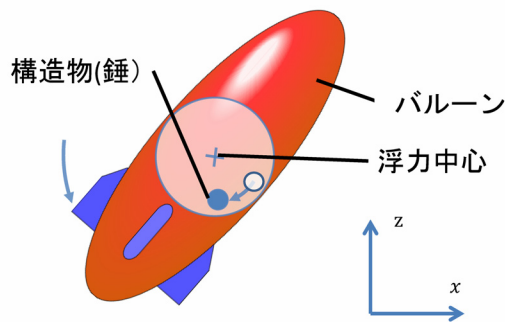


図 5. 重心移動機構 (円盤)

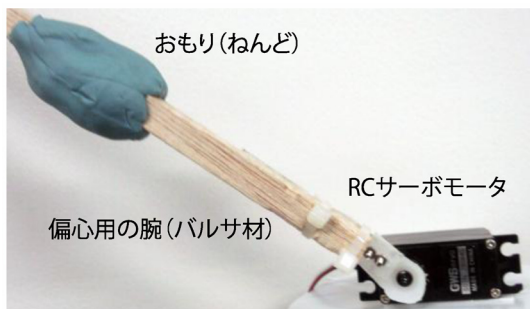


図 6. 重心移動機構試作 (円盤方式)

4. 手招きインタフェース

本稿で対象とするロボットはユーモラスで親しみやすいロボットであり、その感性的な特徴を活用するのであればマンーマシンインタフェースは直観的で簡単なものが望ましい。そこでユーザがロボットを手招きすることでユーザに近づくインタフェースを提案しその技術開発を行う。

4.1 ハードウェア 直径 30 mm、長さ 35 mm の WiFi カメラ (株式会社オウルテック製、Ai-Ball) をユーザ観察カメラとしてロボットに搭載する。カメラの概観を図 7 左上に示す。仕様として重量は 25 g、消費電力 300 mW、画素数 30 万画素、解像度 640×480、CR2 電池で動作する。

4.2 ソフトウェア カメラ画像は画像処理用パソコンに送信され、パソコンでは第一処理として画像の肌色抽出を行う。すると背景画像からヒトの皮膚が露出している部分だけが抽出される。つまりここでは顔と手を想定している。肌色抽出画像にオプティカルフロー処理を施して、画像中の抽出点の速度ベクトル成分を解析する。ユーザが「コイコイ」と手招きするのであれば顔は動かず、手だけが特徴的に動いていることが予想できる。

4.3 実験及び検討 図 7 にパソコンの処理画像を示す。上段右図は取得画像から肌色画像だけを抽出し二値化していることを示している。下段図は肌色抽出画像にオプティカルフロー処理を施したものである。画面の矢印は画像中の特徴点の速度ベクトルを可視化しており、この速度ベクトルを検出することで手招きか手をかざしているだけかを判別する。下段左図の数字の羅列はオプティカルフローのテキスト出力である。この数値が閾値を超えればロボットに動作コマンドを発行する。

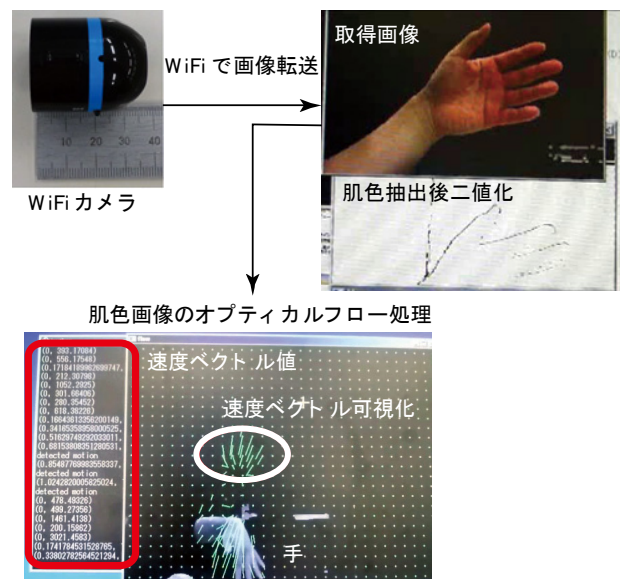


図 7. 手招きインタフェース処理フロー図

5. システム開発

前節までの基礎技術を統合し、ロボットとしてのシステムインテグレーションを行う。図8を参照されたい。

5.1 ロボット部品の材料について ヒト生活空間においてヒト大の寸法で複雑な形状を持ちながら本質的な対人安全性を有する本ロボットの特徴を示すためには、アルミシートの袋形状は不適合であり、親しみやすく見た目に形状を短期間に製作する必要性から塩ビで製作した。低ガスバリア性能はヘリウム再充填によって対応する。バルーン製のロボット部品を設計し市井のバルーン製作者へ外注した。案内サービスである本研究の目的から、親しみやすくユーモラスな外観が適当であると考えた。また見た目に高剛性でなく、金属光沢でない移動体はそれだけで目新しいと考えた。各種展示会が秋期に実施されそこのデモンストレーションを計画していたことからハロウィーンが連想されるようなロボット形状とした。直径1,400mm、高さ1,000mm、浮力200gで設計を行った。

5.2 関節駆動機構と重心移動機構の実装 関節駆動機構についてはロボットの腕を動かすことを目的とし、胴体と手を別部品とし、それらをBMFでつないだ。関節駆動機構の実装を図9に示す。また図7の重心移動機構試作をロボットの頭頂部に装備し動作実験を行った。実装と動作過程を図10に示す。おもりの位置によりロボットの姿勢が前後に変化していることが分かる。

5.3 移動形態 三次元物体の三次元における位置姿勢を制御することは困難であり次段階の開発項目とし、本稿ではロボットの移動は二輪移動ロボット（ローバー）で行う。図11にロボットをけん引するローバーとその仕様を示す（ヴィストン株式会社製、ビュートローバー）。このローバーに図8に示す浮力を有するバルーンをけん引させる。三次元の位置姿勢制御から平面における二次元の位置姿勢制御に帰着することで、制御と操縦が容易になる。

5.4 案内経路について 提案したロボットの対人安全性の概念を示すことを優先し、ロボットの動きがよく分かる直線経路による基礎的な実験を行う。自律移動は次段階

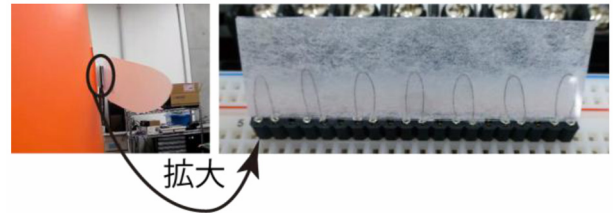


図9. 関節駆動機構実装



図10. 重心移動機構動作過程

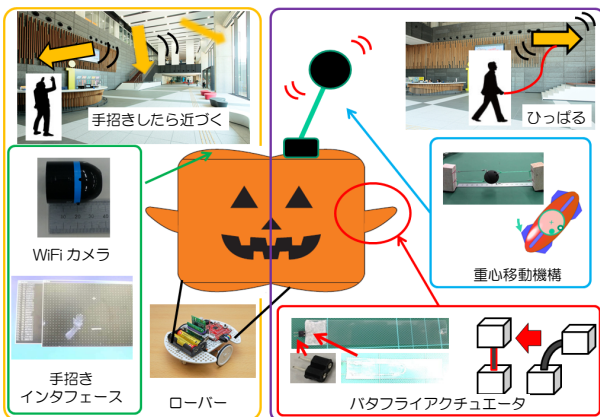


図8. バルーンロボット



外形	W112×D130×H60 (mm)
重量	230g (電池搭載時)
駆動方式	DC モーター×2
センサ	赤外線センサ×2
電源	単三型ニッケル水素電池×2
基盤	VS-WRC103LV (ARM/LPC1343 搭載)
インタフェース	Bluetooth®2.0, クラス2

図11. ローバー仕様

の開発項目に積み残し、ロボットの移動はオペレータによる遠隔操作である。なお、自律移動時にロボットの動作トリガとなるマン-マシンインタフェースは第4節で開発済みであり実装を行う。

5.5 システムインテグレーションと実験 再度図8を参照願いたい。ユーザの手招きを認識し、それを動作トリガとする案内ロボットである。バルーンは塩ビ製で、ヘリウム揚力により浮遊しており対人や対物衝突時に問題はない。ローバーをバルーン下部に取り付け、ローバーの車輪が床と接触し移動するために必要な摩擦力を発生するようにバルーンの浮力とおもりを調整した。使用したローバーは230gと十分軽量であり衝突による事故の可能性は極めて低い。

システムの処理フローを図12に示す。ロボットは3つの処理部から構成されている。画像処理とロボット動作全体を統括するパソコン、ローバー制御部、関節駆動機構と重心移動機構を制御する駆動制御部の3部である。ローバー制御部にはARMチップ、駆動制御部にはArduinoマイコンを使用した。また通信経路は、ロボットに取り付けたカメラと処理パソコンとの通信は無線LAN、パソコンとローバー間の通信、及びパソコンと駆動機構制御部間の通信は

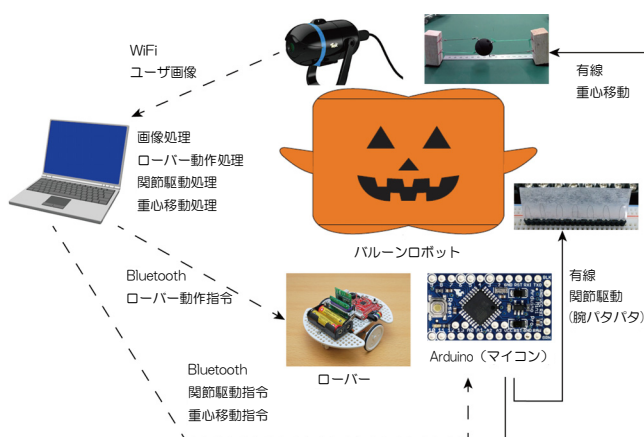


図12. 情報処理フロー



図13. 引張りによる経路案内

Bluetoothで構築した。WiFiカメラの映像はOpenCVとpythonによって処理系を構成し、オプティカルフローベクトルをテキストとして出力する。それを閾値としてローバー制御部に移動開始トリガを送信する。ローバーが移動を完了すると制御部から動作完了トリガがパソコンに戻され、パソコンから駆動制御部へ動作指令が送信される。

ユーザの手招きを認識し動作トリガが発行されていることをオペレータが確認し、パソコン経由でゲーム패드からローバーを遠隔操作した。その経路は直線状A-B区間であった。実験風景を図13に示す。

6. 結論

サービスロボットの本質的な対人安全性を軽量化によって実現する着想に基づき、案内サービスにおける基礎的な機能を、試作軽量ロボットで実験的に示した。現在、完了している開発は直線状A-B区間の誘導に限定されている。また、自律移動ではなくオペレータ操作である。これらは以下の三段階の開発で解決可能と考えられる。

第一段階：ローバーをライトレース可能な仕様に変更

第二段階：ロボットが読んで分かるマーカの定義づけ

(停止、転回、等)

第三段階：ロボットの移動経路にラインやマーカを施工

本質的な対人安全性を確保したロボットは調査の範囲内では見当たらず新たなロボティクスの価値を開拓したと言える。このことは第二期中期計画の新産業創出型研究に直接つながり、機械、電気産業のみならず玩具製造業者、広告業者、福祉介護機器開発業者、他に広く波及する内容であると考えられる。

(平成26年7月7日受付、平成26年8月18日再受付)

文 献

- (1)金, 西岡, 川村:「インフレイタブル構造3DOFロボットアーム」, ROBOMECH 2013 (2013)
- (2)Inflatable Robots by Otherlab: “A Walking Robot (named Ant-Roach) and a Complete Arm (Plus Hand)”, <http://www.hizook.com/blog/2011/11/21/inflatable-robots-otherlab-walking-robot-named-ant-roach-and-complete-arm-plus-hand>
- (3)Robots with Inflatable Links: <http://www.hizook.com/blog/2011/11/21/inflatable-robots-otherlab-walking-robot-named-ant-roach-and-complete-arm-plus-hand>
- (4)iRobot Developing Inflatable Robot Arms: <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/military-robots/irobot-developing-inflatable-robot-arms-inflatable-robots>