

HangBot: パンチングメタルへの機械的拘束を利用した天井移動ロボット

— 主要メカニズムの開発と性能評価実験 —

福井 類^{*1}, 森下 広^{*2}, 森 武俊^{*1} 佐藤 知正^{*1},

HangBot: a Ceiling Mobile Robot Utilizing Mechanical Constraint to Perforated Metal

— Key mechanisms development and performance evaluation experiments —

Rui Fukui^{*1}, Hiroshi Morishita^{*2}, Taketoshi Mori^{*1}, and Tomomasa Sato^{*1}

^{*1} Graduate School of Information Science and Technology, the University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

^{*2} HMI Corp. Matsudo Paresu 1002, 35-2 Koyama, Matsudo, Chiba 271-0093, Japan

This research aims to develop a ceiling mobile robot that can sustain a large payload and can locomote freely under a ceiling space. In our approach, a perforated metal, one of the recent popular architecture materials, is utilized as a ceiling plate and the robot hooks and hangs the sequential holes of the ceiling plate by mechanical constraint. To realize the robot, the authors developed three key mechanisms, (1) ceiling hanging mechanism for the perforated metal, (2) horizontal locomotion mechanism like an inchworm, and (3) pantograph mechanism for smoothing horizontal locomotion speed and for load balancing. A unit testing of the ceiling hanging mechanism and the integrated horizontal locomotion experiments confirmed the good performance of each mechanisms and the feasibility of mechanically constrained ceiling mobile robot.

Key Words : Ceiling mobile robot, Perforated metal, Human-robot symbiosis, Intelligent environment

1. 緒 論

我々の研究グループではこれまで、生活環境において人を支援するサービスロボットの移動手段について議論をし、人とロボットが通常使用する空間を分離するという方策を提案してきた⁽¹⁾。特に人が通常使用していない空間として天井空間に注目し、ロボットは通常この天井空間を利用しつつ、必要なときに天井より生活空間にアクセスすることで、不必要な人とロボットの干渉を防止することを検討してきた。

天井面や壁面を移動するロボットの研究では、レール式⁽²⁾、真空吸着式⁽³⁾⁽⁴⁾、電磁石式⁽⁵⁾⁽⁶⁾などの原理により、対象平面への吸着を実現しているものがあったが、我々の研究では永久磁石誘導型天井吸着法と呼ばれる新たな天井吸着・移動方式を提案した⁽¹⁾。この方式は永久磁石で天井面の上下に分割されたロボットを連結し、上面を水平移動ロボットとすることで、下側のアクチュエーションロボットが自由に空間を移動出来るというものであった。

一方で、Fig. 1(a)のような人の歩行支援を行うようなロボットを考えた場合、従来研究の物品搬送応用と

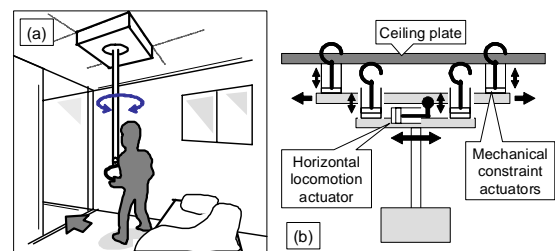


Fig. 1 Basic concepts of (a) walking support application, (b) mechanical constraint ceiling mobile robot.

は異なり大きな荷重を支持しなければならない、この場合 Fig. 1(b) のイメージ図のように天井に対して機械的な構造を引っ掛けて吊り下がるという方式を検討することが機械設計の手順としては自然である。

Table 1 に磁石吸着方式と機械拘束方式の定性的な比較検討を示す。表が示すように機械的拘束を用いる天井懸架方式は、磁石を用いる方式とは異なる特長を有すると考えられる。本研究では機械的拘束によって

Table 1 Qualitative comparison of hanging methods.

Method	Permanent magnet	Mechanical constraint
Constraint of horizontal locomotion	No constraint	
Energy for sustaining	Unnecessary	
Horizontal locomotion smoothness	Very smooth	Smooth but noisy because of mechanical contacts
Payload limitation factor	Magnet absorption force	Mechanism strength
Anti-drop mechanism	Essential	Optional
Ceiling material	Any kinds	Materials with mechanical workability

^{*1} 東京大学 大学院情報理工学系研究科 (〒 113-8656 文京区本郷 7-3-1) {fukui, tmori}@ics.t.u-tokyo.ac.jp

^{*2} 有限会社 エイチ・エム・アイ (〒 271-0093 松戸市小山 35-2 松戸パレス 1002) hmi@bekkoame.ne.jp

天井に懸架し大きな荷重を支持しつつ、自由に移動するロボットの実現性を確認し、その問題点と解決方を明らかにすることを目的とする。具体的には(1)天井に機械的に懸架する機構、(2)水平移動を実現する機構群の開発を行い、それらのコア機構の単体実験及び天井移動ロボット統合実験について述べる。

本論文の構成は次の通りである。第2章では関連研究について整理し、本研究が採用するアプローチについて述べ、本研究が目標とするロボットの仕様をまとめる。第3章では上記仕様を実現するための2種の主要機構について述べ、それらをロボットに統合する方法について述べる。第4章では試作した主要機構及びロボットの基本性能を評価する。第5章は結論である。

2. 関連研究の整理と本研究のアプローチ

本章では、まず機械的拘束によって天井を移動するロボットの関連研究とそれらで採用されているアプローチの問題点について述べ、続いて本研究が採用するアプローチについて述べる。最後に目標とするロボットの仕様について整理する。

2.1 関連研究 一般的な天井を移動する機械は、天井に張り巡らされたレールもしくは門型クレーンのように脚構造部の上を移動する。しかし、このような方法の場合、(1)移動可能な領域が制限される、(2)同時に動作することの出来るロボットが1台に限定される、(3)複数ロボットの交差や追い越しが出来ない、といった問題があるため本研究では対象としない。

上記の制限がない移動機構として、Inoueらは金網構造にフックをひっかけてぶら下がるタイプの多脚ロボット (ASTERISK) を開発している⁽⁷⁾。Luらはサルのように雲梯にぶら下がり移動をする多関節ロボット (Gorilla III) を開発している⁽⁸⁾。このような多関節ロボットの場合、柔軟な移動が可能ではあるが、多数のアクチュエータを用いているため製造・メンテナンスコストに配慮しなければならない。

一方、Smithらは天井に一定間隔に設置したアンカー構造を利用し、Pivot ターンのように片側のアンカーを固定しつつ、ロボット全体を回転させて、他方のアンカーを掴む動作をする ACROBOTER と呼ばれるロボットを提案している⁽⁹⁾。アンカー構造を一定間隔で天井に敷設するために特別な天井構造を用意しており、またアンカーを連続的につかみ変える Pivot ターン動作の制御も複雑である。

関連研究より、天井構造として連続幾何パターンを有する素材を設置しその構造に懸架するという方式は、機械的拘束により天井移動を実現するロボットを実現するために有効であると考えられる。よって本研究が

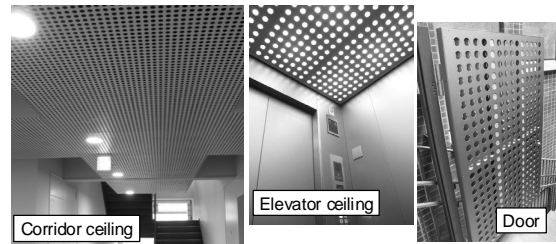


Fig. 2 Architectural applications of perforated metal.

取り組むべき課題は次のように整理される。

1. 天井面で並進2自由度、旋回1自由度の動作を可能な限り少数のアクチュエータで実現する。
2. 天井移動方法がシンプルで、複雑な制御が不要。
3. 天井構造が簡素である。

次節では上記課題に対するアプローチについて論ずる。

2.2 本研究のアプローチ 本研究では昨今建築素材として使用されることが多くなったパンチングメタル (Fig. 2) に注目する。2次元平面に連続的な幾何構造を有するという点では関連研究と同様であるが、パンチングメタルは板金加工によって成形されるため、隣接する天井板との連結部が容易に構成できる。

このパンチングメタルの穴部に機構を挿入し、ロボットの筐体を天井に懸架させる。そして移動に関しては並進自由度と旋回自由度を異なる枠組みに実装することとする。つまり、並進2自由度は2次的に広がっているパンチングメタルの穴を Fig. 3 に示すように掴み変えることによって2つのボディを尺取虫のように動作させることによって実現する。一方の旋回自由度は並進2自由度に動作する筐体の下に別途1自由度のアクチュエータを設けることによって実現することとし、本論文では検討対象としない。

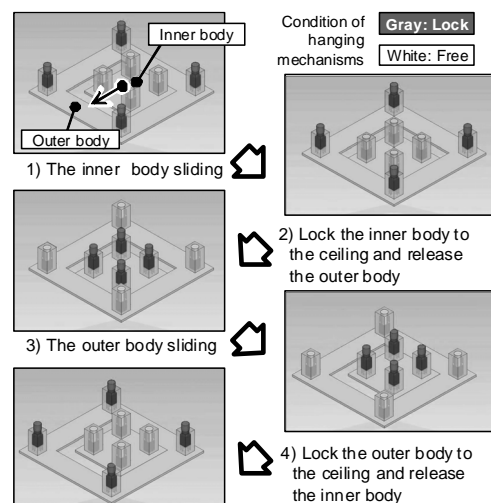


Fig. 3 Sequential images of horizontal worming motion.

2.3 天井移動ロボットの仕様 本研究で実現を目指す天井移動ロボットの仕様を Table 2 にまとめる。基

Table 2 Configured specification of a ceiling mobile robot.

Locomotion area : Scalable	Ceiling height : Preference
Robot number in the simultaneous operation : Multiple	Overtaking or crossing locomotion between robots : Possible
Ceiling material : Perforated metal made of stainless steel	Locomotion direction : Two directions (X and Y)
Maximum payload : 100 [kg]	Maximum horizontal locomotion speed : 100 [mm/s]

本的な要求として、動作領域が拡張可能であり、複数のロボットが自由に行き来可能であることがある。物品搬送だけでなく歩行支援等への拡張も考慮し、最大運搬荷重を 100 [kg]、水平移動速度を 100 [mm/s] (人のゆっくりとした歩行を想定) と設定した。

3. 天井移動ロボットの設計

本章ではまず天井移動ロボットの要となる天井懸架機構の設計について述べ、続いてその懸架機構を用いて水平移動を実現する機構について示す。最後に主要機構の天井移動ロボットへの統合について述べる。

3.1 天井懸架機構の設計 パンチングメタルに懸架するためには Fig. 4 に示すように (1) 機構を穴部に挿入する、(2) 穴部から機構が抜け落ちないようにロックするという二つの動作が必要となる。この二つの動作は単純には 2 つのアクチュエータが必要となるが、本研究では可能な限りアクチュエータ数を低減するためこれらを 1 つのアクチュエータで実現する。

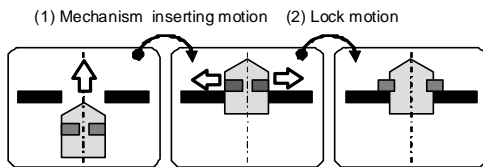


Fig. 4 Ceiling hanging motion comprises two motions.

ロボットのボディを 2 分割させて尺取虫のように動作させる場合、天井に懸架されていない側のボディには自重と運搬物の荷重が加わり下方に撓むことになる。よって懸架されていないボディに搭載されている懸架機構はこの撓み分だけ自らのボディを持ち上げる能力を有する必要がある。本研究では懸架機構の最大持ち上げストロークを 5 [mm] とし、筐体の撓みがこの範囲に収まるように設計することとした。以上を整理すると、天井懸架機構には次の 2 つの課題がある。

- 穴部への機構挿入とロックを 1 つのアクチュエータで実現する。
- 天井面と懸架機構に 5 [mm] の隙間があっても、ロック時に自身を持ち上げる動作を実現する。

これらの課題を解決する機構として、Fig. 5 に示す機構を開発した。本懸架機構の駆動は中心にあるネジ

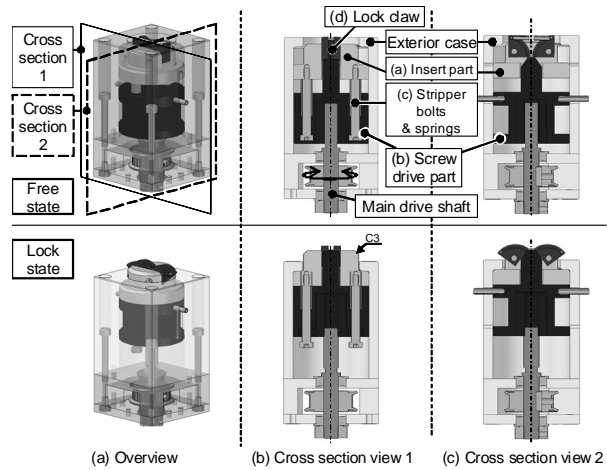


Fig. 5 Overview of the designed hanging mechanism.

シャフトによって行う、解放状態では挿入部 (a) はバネによってネジ駆動部 (b) の上方に支えられている。ネジシャフトが駆動されると挿入部とネジ駆動部が一緒になって上昇し、穴の中に構造が挿入される。続いてこの挿入部が外装ケースと接触してもネジシャフトを駆動し続けると、挿入部とネジ駆動部に挟まれていたバネが縮み、ネジ駆動部がロック爪を押し上げるように動作する。以上の動作によりネジシャフトの駆動のみで挿入部の駆動とロック爪の駆動が実現される。

本設計では天井穴のサイズは汎用の抜き型が使用可能なように $\phi 30$ [mm] とし、挿入部側は $\phi 29$ [mm] とした。挿入部の先端は天井穴と位置ずれがあっても挿入動作が可能ないように 3 [mm] のテーパが施してある。

ロック爪は Fig. 6 に示すように回転によって展開するため、懸架機構と天井プレートに空隙があってもロック爪が自身を持ち上げる動作をする。一方でネジシャフトの押し付け力 (F_i) とロック爪の持ち上げ力 (F_o) の関係は eq. (1) のようになっている。

$$F_o = F_i \times (D_i/D_o) \quad (1)$$

D_i 及び D_o は固定寸法のためロック爪における力の関係は一定になり、懸架機構の設計計算が容易となっている。試作では $D_i \simeq D_o$ と設計したため、入力そのままロック爪の出力になる設定である。4.1 節で本機構の性能評価実験について述べる。

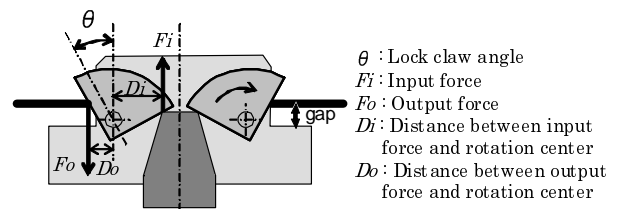


Fig. 6 Detailed view of the lock plate.

3-2 水平移動機構の設計 Fig. 7 に本研究で採用した 2 軸並進スライド方式の水平移動機構を示す。2つの並進スライダを同時に動作させることも可能で、方向転換をする時に待ち時間がないという利点がある。この方式ではインナ、アウトの二つのボディによる筐体構成となり、片側のボディに下部モジュールを付けると、そのボディの水平速度は Fig. 8(b) または (c) のように不連続になる。これはロボットの移動状態がユーザから見て直感的でないという問題がある。

そこで Fig. 9 に示すようにインナ・アウトボディの両移動速度を平均化する機構を導入し、速度平均化された作用点に歩行支援用のハンドルやアクチュエーションロボットを搭載する下部ボディを吊り下げることによって、Fig. 8(d) に示すように懸架機構の切り替え動作以外は滑らかにボディを水平移動させる。

このような速度平均化機構として Fig. 10 にあるような機構を検討した。Fig. 10(a) はひし形リンクの対角中点を下部ボディに連結するものである。機構形状はコンパクトであるが、並進スライダと回転リンクの組み合わせのため部品種類が多いという欠点がある。

Fig. 10(b) はパンタグラフ構造の中間点に下部ボディを連結するもので、機構が大きくなる傾向があるが、

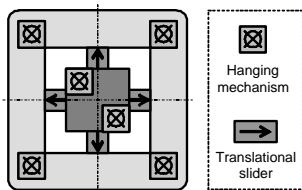


Fig. 7 Two axes translational sliders mechanism.

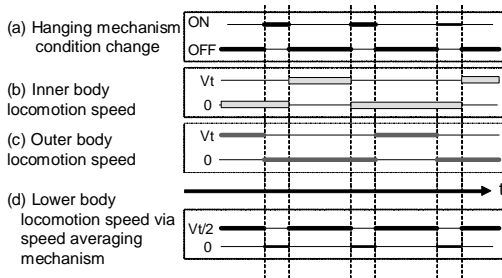


Fig. 8 Sequential pattern for horizontal locomotion.

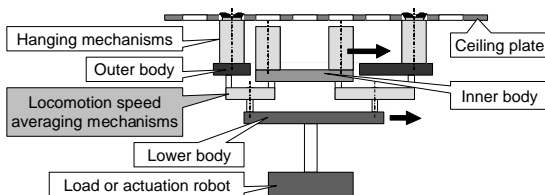


Fig. 9 Robot body framework with locomotion speed averaging mechanisms.

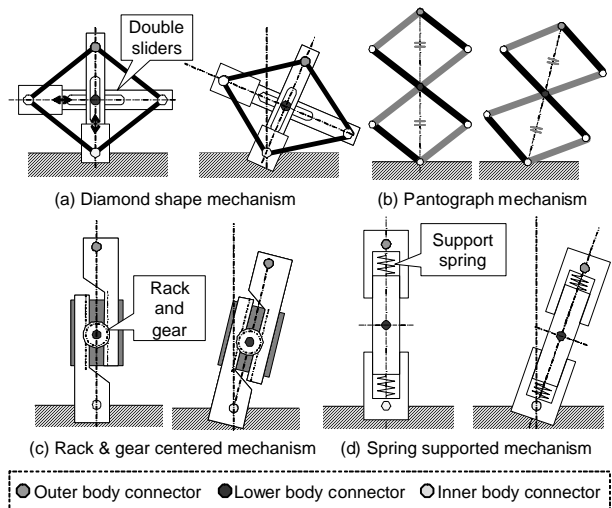


Fig. 10 Mechanisms for locomotion speed averaging.

類似形状の部品のみで構成されるという利点がある。

Fig. 10(c) はラックギアを用いて二つのスライダの中間点に下部ボディを連結するものであり、非常にコンパクトな部品構成で実現できるが、歯車構造を有し、かつ並進スライドする部品の形状が複雑になる。

Fig. 10(d) はバネを用いて、スライダの中間点に下部ボディを取り付ける方法であり、非常に簡素な部品で構成可能であるが、バネ特性や摩擦状態の不一致によりインナ・アウトボディの中間点に下部ボディが位置しない可能性がある。

上記のような特徴に加えて、下部ボディには今回 100 [kg] 近い大きな荷重が掛かるため、その荷重を支えやすい構造が望ましい。よって本研究では Fig. 10(b) のパンタグラフ構造を採用した。他の 3 つの構造と異なり、全ての稼働部位が回転運動のみで構成されるため、部品の加工においても軸間距離の管理のみで正確な平均化動作が得られるという利点がある

Fig. 11(a) に設計したパンタグラフ機構の外観を Fig. 11(b) に試作したパンタグラフ機構を伸縮させた様子を示す。写真より右端の半分の変位で中心部が変位しているのが分かる。4.2 節で本パンタグラフ機構を用いた速度平均化動作実験について示す。

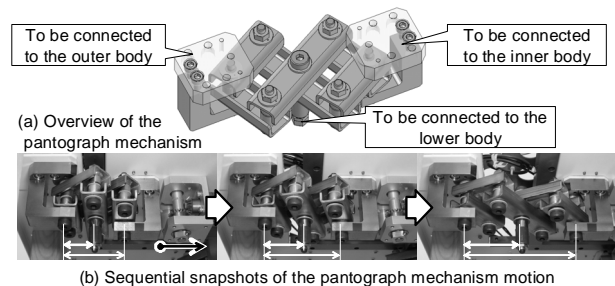


Fig. 11 The pantograph mechanism.

3.3 天井移動ロボットへの統合 前節までで紹介した主要機構を天井ロボットに統合する設計について述べる。まず Fig. 12 に天井移動ロボットの外観を、Fig. 13 に機能ブロック図を示す。

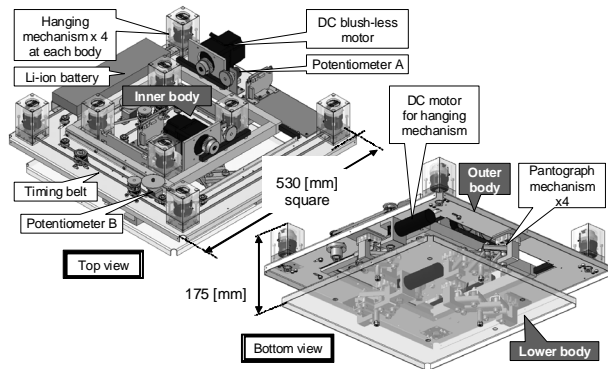


Fig. 12 Overview of the ceiling mobile robot.

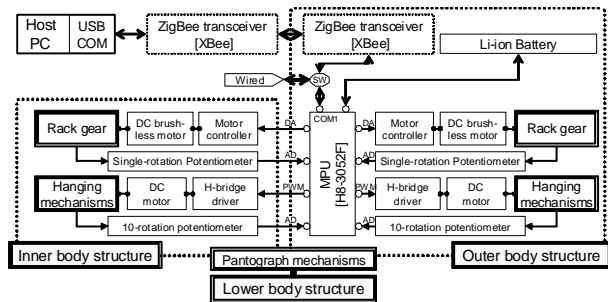


Fig. 13 Functional block diagram.

インナ・アウトボディには4つずつ天井懸架機構が搭載され、両ボディは2つの並進スライド機構と4つのパンタグラフ機構で連結されている。パンタグラフ機構中央に下部ボディ模擬プレートを設置した。

タイミングベルトを用いて4つの懸架機構の駆動軸を連結させて、1つのDCモータで駆動している。懸架機構の位置認識には多回転ポテンシオメータを用いた。DCモータを用いた理由は、DCモータでは負荷トルクが小さいとき、すなわち挿入部を穴に差し込む動作のときは高い回転数ですばやい動作を行い、負荷トルクが大きいとき、即ちロック爪を駆動して持ち上げる動作のときは自然と回転数が低下するからである。

水平移動にはDCブラシレスモータを用い、位置認識には単回転ポテンシオメータを用いている。水平移動1回ごとの移動距離を50 [mm]と設定し、これに伴い並進スライド機構のストローク及び天井の丸穴の間隔も50 [mm]に合わせた。

3.4 ロボット用天井の設計 Fig. 14 にロボット用天井の概要を示す。本天井は500 [mm]角のプレートを1つのモジュールとし、これを天井吊りボルトに固定されたアンカーボックスに連結し、天井面を構成

する。隣り合う天井板は曲げ部同士をボルトで固定し撓みを抑制している。

天井上面には補強用のリブなどの構造があるが、天井下面は完全にフラットな状態となっているため、従来研究⁽¹⁾とは異なりアンカーボルト周辺をロボットが避けることなく動作できる。今回は4つのモジュールを連結して1 [m]×1 [m]の動作用天井を構築した。

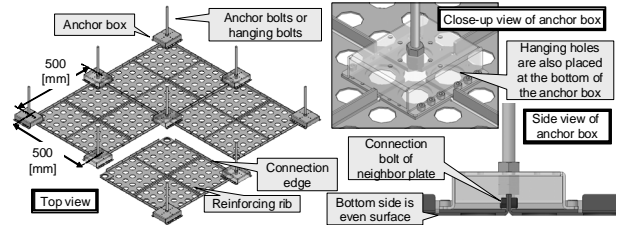


Fig. 14 Overview of the special designed ceiling.

4. 実験

本章ではまず天井懸架機構単体の性能を評価する実験を行い、続いて天井移動ロボットとして統合された状態における水平移動性能評価として、速度平均化機能と荷重付加時の移動機能について実験を行う。

4.1 天井懸架機構単体実験 Fig. 15 に示す専用テストベンチを用いて実験を行った。

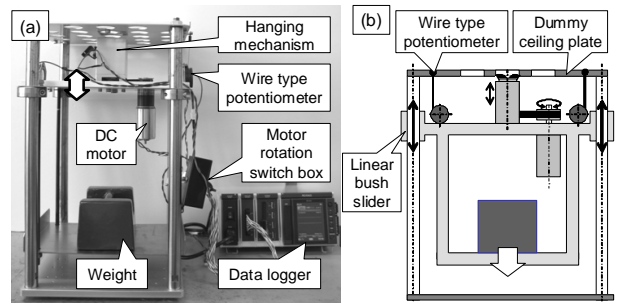


Fig. 15 (a) Hanging mechanism test bench, (b) schematic diagram of test bench.

DCモータは回転方向切り換え用のスイッチボックスを経由して、スイッチング電源に接続されているだけで、速度制御は行っていない。ロック側にモータが回転する方向にはリミットスイッチを搭載し、ある位置までネジ駆動部が移動するとモータとの接続が切断される。実験設定及び計測項目は次の通りである。

- 実験設定 ⇒ 天井面・懸架機構間距離: 1, 3, 5 [mm] の3種, 負荷: 10, 20, 25[kg] の3種, 試行数: 3
- 計測項目・使用センサ ⇒ 懸架機構変位: Celesco 製ワイヤ型ポテンシオメータ“MTA-3E-5KW-MB”, モータ電流: UR-D 製電流センサ”HPS-15-AS”

Fig. 16 に懸架機構の動作の様子を示す。また Fig. 17 に取得されるデータの一例を示す。この図は懸架機構

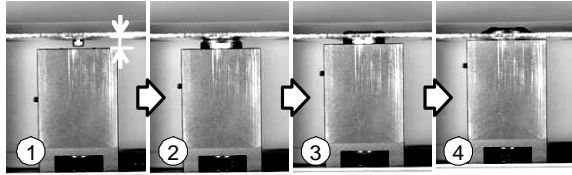


Fig. 16 Side view of the hanging mechanism motion.

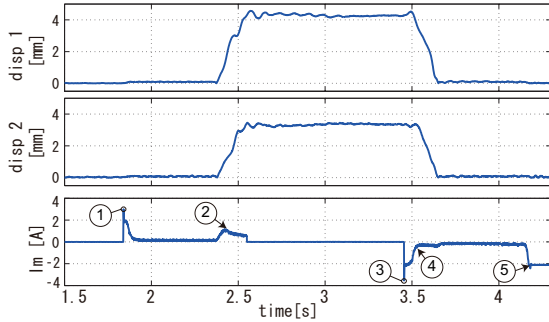


Fig. 17 Measured data example of hanging mechanism unit test (gap: 5 [mm], weight: 10 [kg]).

Table 3 Result of hanging mechanism unit test.

gap [mm]	Weight [kg]			unit [A]	gap [mm]	Weight [kg]			unit [s]
	10	20	25			10	20	25	
1	0.40	0.48	0.54		1	0.69	0.69	0.69	
3	0.76	0.92	1.0		3	0.70	0.70	0.71	
5	1.2	1.6	1.7		5	0.71	0.74	0.75	

が一度ロック状態になり、その後再び解放状態になるまでの様子を示している。disp 1 及び disp 2 はテストベンチの両端のワイヤ型ポテンシオメータの変位量を示しており、Im はモータ電流量を示している。懸架機構がロックする側の電流を正としている。

電流の遷移について説明すると、① スイッチをロック側にすると突入電流が流れモータが回転を始める。② ロック爪が天井穴に引っかかり、懸架機構及び重りを持ち上げる。③ スイッチを解放側にするとモータが逆転を始める。④ ロック爪を天井穴から引き抜く。⑤ ネジ駆動部がストロークエンドまで回転し、停止する。

3 × 3 = 9 通りの設定で懸架機構は重りを持ち上げてロック状態に遷移することが出来た。ロック動作時の最大電流及びロック動作に必要な経過時間 (Fig. 17 において①から②の後に電流値が0になるまで、3試行の平均) を整理したものを Table 3 に示す。

結果より荷重が大きいほど、また天井面とのギャップが大きいほど最大電流が大きくなることが分かった。荷重が大きいほど電流が大きくなることは直感的である。一方でギャップが大きいほど電流が大きくなるのは、ギャップに比例した仕事を懸架機構は求められるにも関わらず、経過時間がそれほど増えていないためである。これは DC モータの特徴的な動作と言える。

4.2 水平移動性能評価実験 天井移動ロボットの状態に組み上げた場合に、パンタグラフ機構によってインナボディ及びアウトボディの速度が平均化され、下部ボディの運動を生成していることを確認し、併せて荷重負荷時の水平移動性能について評価する。

実験の設定は Fig. 18 に示すように、ロボットの後部に支柱を設置し、その支柱とインナ、アウト、下部の3つのボディの距離をワイヤ式のリニアエンコーダ (マイクロテックラボラトリ製 “MLS-30-4500-1000”, 最小分解能 0.02 [mm]) を用いて計測した。また懸架機構と天井面との距離を計測するリニアポテンシオメータ (緑測器, LP-10FB) を懸架機構に取り付けた。

実験の様子を Fig. 19 に、計測結果を Fig. 20 に示す。Fig. 20(a) よりインナ、アウトボディの移動速度が平均化され、下部ボディがインナ、アウトのどちらか一方でも動作していると、下部ボディが牽引されている様子が分かる。なお本試験ではロボットの制御は人の手動指令によって与えているが、自動制御では約 1.5 [s] でインナボディ側懸架状態からアウトボディ側懸架状態に遷移することが出来た。この遷移時間は目標と

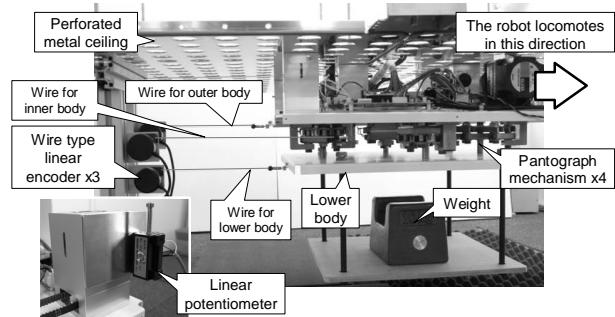


Fig. 18 Experimental setup for horizontal locomotion.

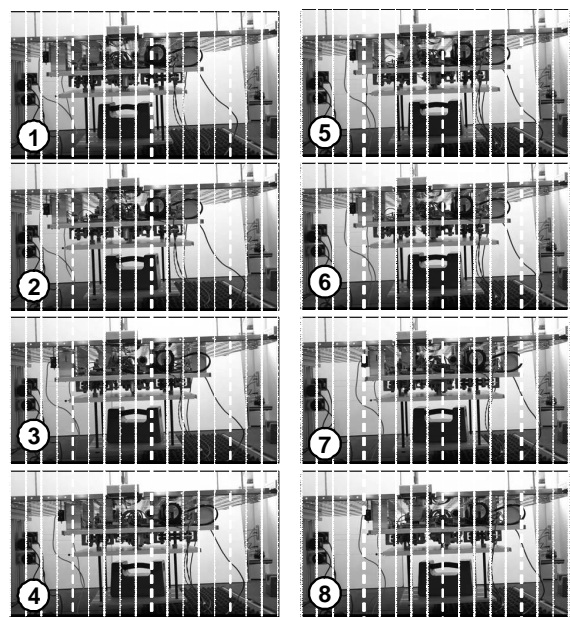


Fig. 19 Sequential images of horizontal locomotion.

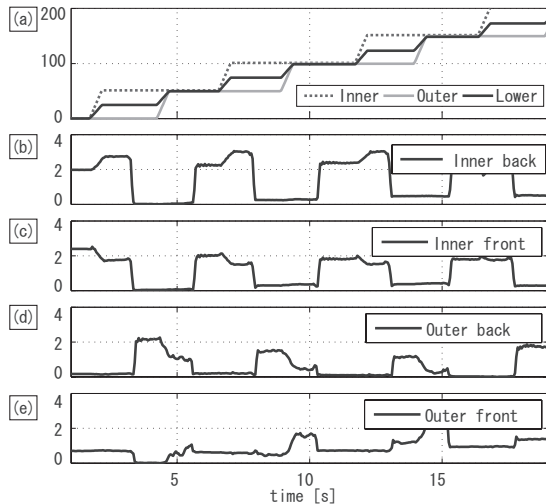


Fig. 20 Sensor outputs of horizontal locomotion experiment; (a) three bodies drive distance, (b)~(d) displacement between the hanging mechanisms and the ceiling.

する 100 [mm/s] の水平移動の障害となるものであり、モータの大型化による高速化が今後の課題である。

Fig. 20(b)~(d) より、アウトボディが移動するときにはアウトボディに搭載された懸架機構と天井面との距離が大きくなり、インナボディが移動するときはその逆になることが確認された。これはパンタグラフ機構によって、荷重がインナ・アウト両ボディに加わるため、天井懸架していないボディが下方に引っ張られ発生する現象である。但し各ボディに4つの天井懸架機構を搭載し過拘束状態にあるため、(e) のように常に天井面からわずかに離れたような状態のものもあることが分かった。天井懸架していないボディは即ち水平移動するボディであるため、本特性により天井面と接触しない水平移動が実現出来ている。これは速度平均化機構を導入する副次的な効果であると言える。

今回の実験では筐体の剛性不足により、35 [kg] の荷重を搭載した状況までしか水平移動を実現することが出来なかった。各部剛性の向上を行い、我々が目標とする 100 [kg] の荷重が加わった状態でも水平移動を実現可能とすることが今後の課題である。

5. 結 論

本論文では大きな荷重を支持しつつ天井を自由に移動可能なロボットの開発を目標とした。そのため建築素材として一般的になりつつあるパンチングメタルを天井面として、その穴に機構を挿入して懸架しつつ、その懸架穴を移り変えることによって天井移動をするロボットを提案した。このロボットの実現のために、(1) パンチングメタル天井に懸架するための天井懸架機構、(2) 尺取虫型移動の水平移動機構、(3) 水平移動速

度を平滑化し、荷重の負荷状態を理想的な状態にするパンタグラフ機構を開発した。天井懸架機構の単体試験では 25 [kg] の荷重が負荷されている状態でも、ロック・解放動作を実現出来ることを確認した。また各機構を統合し、仮設の天井面を利用した移動試験においては、パンタグラフ機構が水平移動速度を平滑化するのに有効であること、さらに荷重負荷状態を尺取移動にとって適した状態にする効果があることが分かった。

一方で目標である 100 [kg] を支持・運搬するためにはボディの剛性向上が必要であり、また目標移動速度 100 [mm/s] 実現のためには懸架機構駆動モータの大出力化が必要であることが判明した。しかし、本研究によって機械的拘束によって天井を移動するロボットの基本的な実現性は確認されたと言える。

謝 辞

本研究を進めるにあたって助成を頂いた、財団法人トステム建材産業振興財団に謝意を表したい。

参 考 文 献

- (1) T. Sato et al. Construction of ceiling adsorbed mobile robots platform utilizing permanent magnet inductive traction method. In *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 552–558, 2004.
- (2) Toyota L&F. Roof car. <http://www.toyotaforklift.com/>.
- (3) S. Hirose et al. Machine that can walk and climb on floors, walls and ceilings. In *Proceedings of Fifth International Conference on Advanced Robotics*, pp. 753–758, 1991.
- (4) T. Miyake et al. Vacuum-based wet adhesion system for wall climbing robots -lubricating action and seal action by the liquid-. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics*, pp. 1824–1829, 2009.
- (5) V. Scheinman. Robotworld: A multiple robot vision guided assembly system. In *Proceedings of the 4th International Symposium on Robotics Research*, 1987.
- (6) M. Menon et al. Actuation and position estimation of a passive mobile end effector from across a thin wall for heavy-duty aircraft manufacturing. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 985–991, 2009.
- (7) K. Inoue et al. Omni-directional gait of limb mechanism robot hanging from grid-like structure. In *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1732–1737, 2006.
- (8) Z. Lu et al. Transition motion from ladder climbing to brachiation for multi-locomotion robot. In *Proc. of Int. Conf. on Mechatronics and Automation*, pp. 1916–1921, 2009.
- (9) T.A. Smith et al. 3D path planning with novel multiple 2D layered approach for complex human-robot interaction. In *Proc. of IEEE Int. Sympo. on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, pp. 580–585, 2009.