

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2020年3月5日(05.03.2020)



(10) 国際公開番号

WO 2020/045022 A1

(51) 国際特許分類:
G05D 1/00 (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2019/031291

(22) 国際出願日: 2019年8月8日(08.08.2019)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(30) 優先権データ:
特願 2018-160144 2018年8月29日(29.08.2018) JP

(71) 出願人: 日本電信電話株式会社 (NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION) [JP/JP]; 〒1008116 東京都千代田区大手町一丁目5番1号 Tokyo (JP).

(72) 発明者: 川野 洋(KAWANO, Hiroshi); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町三丁目9番11号 N T 知的財産センタ内 Tokyo (JP).

(74) 代理人: 中尾 直樹, 外 (NAKAO, Naoki et al.); 〒1600022 東京都新宿区新宿三丁目1番22号 新宿NSOビル6階 Tokyo (JP).

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS,

(54) Title: MOBILE ROBOT, CONTROL METHOD FOR MOBILE ROBOT, AND PROGRAM

(54) 発明の名称: 移動ロボット、移動ロボットの制御方法及びプログラム

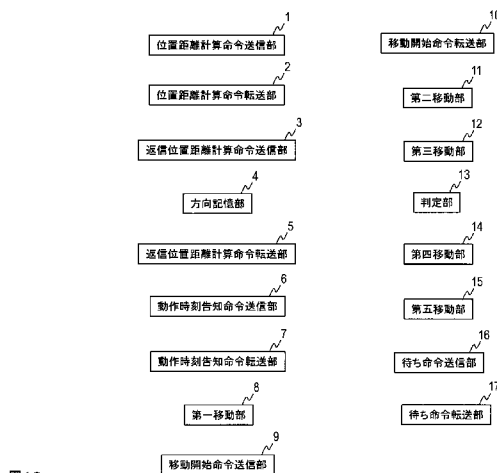


図16

- 1 Position/distance calculation command transmitting unit
- 2 Position/distance calculation command transferring unit
- 3 Reply position/distance calculation command transmitting unit
- 4 Direction storage unit
- 5 Reply position/distance calculation command transferring unit
- 6 Operation time notification command transmitting unit
- 7 Operation time notification command transferring unit
- 8 First movement unit
- 9 Movement start command transmitting unit
- 10 Movement start command transferring unit
- 11 Second movement unit
- 12 Third movement unit
- 13 Determination unit
- 14 Fourth movement unit
- 15 Fifth movement unit
- 16 Waiting command transmitting unit
- 17 Waiting command transferring unit

(57) Abstract: Provided is a control technique that can shorten the time required for formation control operations. This mobile robot comprises, for example: a position/distance calculation command transmitting unit 1; a position/distance calculation command transferring unit 2; a reply position/distance calculation command transmitting unit 3; a direction storage unit 4; a reply position/distance calculation command transferring unit 5; an operation time notification command transmitting unit 6; an operation time notification command transferring unit 7; a first movement unit 8; a movement start command transmitting unit 9; a movement start command transferring unit 10; a second movement unit 11; a third movement unit 12; a determination unit 13; a fourth movement unit 14; a fifth movement unit 15; a waiting command transmitting unit 16; and a waiting command transferring unit 17.

(57) 要約: 隊列制御動作にかかる時間を短縮することができる制御技術を提供する。移動ロボットは、位置距離計算命令送信部1、位置距離計算命令転送部2、返信位置距離計算命令送信部3、方向記憶部4、返信位置距離計算命令転送部5、動作時刻告知命令送信部6、動作時刻告知命令転送部7、第一移動部8、移動開始命令送信部9、移動開始命令転送部10、第二移動部11、第三移動部12、判定部13、第四移動部14、第五移動部15、待ち命令送信部16及び待ち命令転送部17を例えば備えている。

MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類：

- 一 国際調査報告（条約第21条(3)）

明 細 書

発明の名称：

移動ロボット、移動ロボットの制御方法及びプログラム

技術分野

[0001] 本発明は、複数のロボットの行動を制御する技術に関する。例えば、複数のロボットを、初期位置における隊列形成状態から協調して移動させ、障害物を回避させ、目標位置で隊列形成をさせるための各ロボットの行動計画を求めるロボット協調制御技術に関する。

背景技術

[0002] 近年、多数の自律移動ロボットを効率的に制御するための研究が活発に行われている。その任務内容は、人の入れない箇所の監視、物品の搬送などさまざまであるが、多数のロボットの協調動作による隊列形成を効率的に行わせるための技術が求められており盛んに研究が行われている。

[0003] 特に、ロボットの隊列制御の中でも、ロボット同士が互いに接したままの状態、アメーバのように全体で移動を行うという仮定の下でのロボット隊列制御においては、ロボット同士の相対的な位置関係から、各ロボットの絶対位置の決定が可能であるという利点と、付加的な位置計測用の装備を必要としないという利点があり、そのようなロボットの研究も行われている（例えば、非特許文献 1，2 参照。）。

[0004] 非特許文献 1 は、全てのロボットが同じ性質を持つ（ホモジニアス）という前提の下で、任意の初期隊列形成状態から目的隊列形成状態へ変形する隊列制御を実現する方法が開示されている。ここでは、8つのロボットを1つの単位として移動させることで、従来よりも効率的な隊列制御を実現している。

[0005] 非特許文献 2 では、各矩形ロボットが異なる性質を持つ（ヘテロジニアス）という前提の下で、任意の形状隊列から他の形状隊列へ変形する隊列制御の方法が開示されている。

[0006] このような、多数のロボットによる効率的な隊列形成を実現するには、それぞれのロボットの配置、動作順序などを事前に計画することが重要である。このような計画においては、当然ながら、複数のロボットが動作する実環境における障害物の存在や経路の形状なども十分に考慮しなければならない。

先行技術文献

非特許文献

[0007] 非特許文献1: Kawano, H., “Complete Reconfiguration Algorithm for Sliding Cube-shaped Modular Robots with only Sliding Motion Primitive”, 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2015), pp.3276-3283, September 2015, Hamburg, Germany.

非特許文献2: R. Fitch, Z. Butler, D. Rus, “Reconfiguration Planning for Heterogeneous Self-Reconfiguring Robots”, in Proc.2003 IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp. 2460-2467, Las Vegas, NV, Oct., 2003.

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0008] 非特許文献2では、各ロボットが接した状態での動作を想定し、各ロボットが異なる特性（ヘテロジニアス）である、つまり、各ロボットの目標位置が特定されている場合の隊列制御を実現している。このような隊列制御は、例えば、カメラを搭載したロボット、車輪を搭載したロボット等の個々に異なる役割がある各ロボットをロボット隊列内の適切な位置に配置させつつ、隊列の形状を制御するといった運用に適している。

[0009] 非特許文献1はホモジニアスを前提としており、隊列変形後の各ロボットの位置が保証されないため、ヘテロジニアスを前提とするような隊列形成の問題に適用することができない。

[0010] 非特許文献2は、ヘテロジニアスを前提とする隊列形成を行うことができ

るが、隊列全体の形状の変形動作と、変形後のロボット位置入れ替えを別個のプロセスとして行わなければならない。つまり、まずロボットの位置は問わずに形状（隊列）を目的隊列に変形する前に、各ロボットの位置が正しい目標位置となるように各ロボットの位置の入れ替えを行うための別の隊列形態をとり、ロボットの位置の入れ替えを行うのである。そのロボット位置入れ替えの処理に非常に時間を要するため、全体として隊列制御にかかる時間が長いという問題がある。

[0011] このような現状に鑑みて、本発明は、隊列制御動作にかかる時間を短縮することができる制御装置、方法及びプログラムを提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0012] この発明の一態様による移動ロボットは、移動ロボットは複数のロボット単位で構成されているとし、各ロボット単位の周囲には他のロボット単位を構成するロボットが移動可能な空隙があり、各ロボット単位には所定の初期位置及び所定の目標位置が定められており、所定の初期位置の集合と所定の目標位置の集合とは接しているとし、所定の初期位置の集合に含まれる位置であって所定の目標位置の集合に接している位置の1つを接続位置とし、移動ロボットは所定の初期位置から接続位置を通して所定の目標位置に移動するとして、複数のロボット単位のそれぞれについて、当該ロボット単位が接続位置にあるロボット単位 j_root である場合に、それぞれ所定の初期値に設定された、接続位置からの相対位置と位置距離計算命令の送信転送回数とを含む位置距離計算命令を隣接するロボット単位に送信する位置距離計算命令送信部と、位置距離計算命令を受信した場合に、位置距離計算命令に含まれる送信転送回数をインクリメントし、位置距離計算命令を受信した方向に応じて位置距離計算命令に含まれる相対位置を更新し、インクリメントした送信転送回数及び更新した相対位置を含む位置距離計算命令を、位置距離計算命令を送信してきたロボット単位以外の、隣接するロボット単位に一度だけ転送する位置距離計算命令転送部と、位置距離計算命令を最初に受信した場

合に、位置距離計算命令を送信してきたロボット単位に、インクリメントした送信転送回数及び更新した相対位置を含む返信位置距離計算命令を送信する返信位置距離計算命令送信部と、位置距離計算命令を最初に受信した場合に、位置距離計算命令を送信してきたロボット単位の方角をroot方角として記憶する方角記憶部と、返信位置距離計算命令を受信した場合に、方角記憶部から読み込んだroot方角に受信した返信位置距離計算命令を転送する返信位置距離計算命令転送部と、複数のロボット単位のそれぞれについて、当該ロボット単位がロボット単位j_rootであり、全てのロボットが送信した返信位置距離計算命令を受信した場合に、返信位置距離計算命令に含まれる相対位置に基づく各ロボット単位の位置に基づいて、各ロボット単位の移動開始時刻を決定し、移動開始時刻を含む動作時刻告知命令を隣接するロボット単位に送信する動作時刻告知命令送信部と、動作時刻告知命令を受信した場合に、動作時刻告知命令を隣接するロボット単位に一度だけ転送する動作時刻告知命令転送部と、最初に移動を開始するロボット単位であり動作時刻告知命令を受信した場合に、接続位置に向けてロボットを移動させる第一移動部と、移動開始後所定の時間が経過した場合に、次に移動するロボット単位宛ての移動開始命令を隣接するロボット単位に送信する移動開始命令送信部と、移動開始命令を受信した場合に、移動開始命令を隣接するロボット単位に一度だけ転送する移動開始命令転送部と、移動開始命令を受信した場合に、接続位置に向けてロボットを移動させる第二移動部と、接続位置に到達した場合に、ロボット単位j_rootから自身のロボット単位の目標位置と、自身のロボット単位の目標位置に到達するためのパスとを取得し、取得した目標位置及びパスに従って自身のロボット単位を移動させる第三移動部と、隣接し移動しようとする位置に他のロボット単位があるかどうかを判定する判定部と、隣接し移動しようとする位置に他のロボット単位があり、隣接し移動しようとする位置が自身のロボット単位の目標位置である場合には、自身のロボット単位を隣接し移動しようとする位置に移動させる第四移動部と、複数のロボット単位のそれぞれについて、当該ロボット単位が他のロボット単位

である場合に、自身のロボット単位が隣接し移動しようとする位置に移動した後に、他のロボット単位を他のロボット単位の目標位置及びパスに従って移動させる第五移動部と、複数のロボット単位のそれぞれについて、当該ロボット単位が他のロボット単位である場合に、所定の待ち時間を含む待ち命令を隣接するロボット単位に送信する待ち命令送信部と、待ち命令を受信した場合に、待ち命令に含まれる待ち時間だけ自身のロボット単位の移動を停止すると共に、待ち命令を隣接するロボット単位に一度だけ転送する待ち命令転送部と、を含む。

[0013] この発明の一態様による移動ロボットは、移動ロボットは複数のロボット単位で構成されているとし、各ロボット単位の周囲には他のロボット単位を構成するロボットが移動可能な空隙があり、各ロボット単位には所定の初期位置及び所定の目標位置が定められており、所定の初期位置の集合と所定の目標位置の集合とは接しているとし、所定の初期位置の集合に含まれる位置であって所定の目標位置の集合に接している位置の1つを接続位置とし、移動ロボットは所定の初期位置から接続位置を通して所定の目標位置に移動するとして、複数のロボット単位のそれぞれについて、当該ロボット単位が接続位置にあるロボット単位 j_root である場合に、それぞれ所定の初期値に設定された、接続位置からの相対位置と位置距離計算命令の送信転送回数とを含む位置距離計算命令を隣接するロボット単位に送信する位置距離計算命令送信部と、位置距離計算命令を受信した場合に、位置距離計算命令に含まれる送信転送回数をインクリメントし、位置距離計算命令を受信した方向に応じて位置距離計算命令に含まれる相対位置を更新し、インクリメントした送信転送回数及び更新した相対位置を含む位置距離計算命令を、位置距離計算命令を送信してきたロボット単位以外の、隣接するロボット単位に一度だけ転送する位置距離計算命令転送部と、位置距離計算命令を最初に受信した場合に、位置距離計算命令を送信してきたロボット単位に、インクリメントした送信転送回数及び更新した相対位置を含む返信位置距離計算命令を送信する返信位置距離計算命令送信部と、位置距離計算命令を最初に受信した場合

に、位置距離計算命令を送信してきたロボット単位の方角をroot方角として記憶する方角記憶部と、返信位置距離計算命令を受信した場合に、方角記憶部から読み込んだroot方角に受信した返信位置距離計算命令を転送する返信位置距離計算命令転送部と、複数のロボット単位のそれぞれについて、当該ロボット単位がロボット単位j_rootであり、全てのロボットが送信した返信位置距離計算命令を受信した場合には、返信位置距離計算命令に含まれる相対位置に基づく各ロボット単位の位置に基づいて、各ロボット単位の移動開始時刻を決定し、 $k=1, \dots, K$ として、ロボット単位j_kの移動開始時刻になった場合に、ロボット単位j_kと、ロボット単位j_kからたどっていける場所にあり接続位置からのマンハッタン距離が最も大きい位置にあるロボット単位j_moveと、ロボット単位j_moveの位置からロボット単位j_kの位置への経路情報とを含む動作開始命令を隣接するロボット単位に送信する動作開始命令送信部と、動作開始命令を受信した場合に、動作開始命令を隣接するロボット単位に一度だけ転送する動作開始命令転送部と、ロボット単位j_moveについて、動作開始命令を受信した場合には、ロボット単位j_moveをロボット単位j_kの位置に移動させる第一移動部と、ロボット単位j_kについて、ロボット単位j_moveがロボット単位j_kの位置に移動した後に、ロボット単位j_kを接続位置に向けて移動させる第二移動部と、接続位置に到達した場合に、ロボット単位j_rootから自身のロボット単位の目標位置と、自身のロボット単位の目標位置に到達するためのパスとを取得し、取得した目標位置及びパスに従って自身のロボット単位を移動させる第三移動部と、を含む。

発明の効果

[0014] 本発明によれば、隊列制御動作にかかる時間を短縮することができる。

図面の簡単な説明

[0015] [図1]ロボットの移動を説明するための図。

[図2]ロボットの初期位置及び目標位置を説明するための図。

[図3]ボイドの移動の様子を説明するための図。

[図4]ロボット単位を説明するための図。

- [図5]ロボット単位の移動を説明するための図。
- [図6]ロボット構造の連続性を維持するための制御を説明するための図。
- [図7]ロボット単位の移動を説明するための図。
- [図8]ロボット単位の移動を説明するための図。
- [図9]ロボット単位の移動を説明するための図。
- [図10]ロボット単位の移動を説明するための図。
- [図11]ロボット単位の移動を説明するための図。
- [図12]ロボット単位の移動を説明するための図。
- [図13]ロボット単位の移動を説明するための図。
- [図14]ロボット単位の移動を説明するための図。
- [図15]ロボット単位の例を説明するための図。
- [図16]第一実施形態の制御装置を説明するためのブロック図。
- [図17]第一実施形態の制御方法を説明するための流れ図。
- [図18]第二実施形態の制御装置を説明するためのブロック図。
- [図19]第二実施形態の制御方法を説明するための流れ図。
- [図20]第三実施形態の制御装置を説明するためのブロック図。
- [図21]第三実施形態の制御方法を説明するための流れ図。

発明を実施するための形態

- [0016] 以下、本発明の実施形態について説明する。なお、以下の説明に用いる図面では、同じ機能を持つ構成部や同じ処理を行うステップには同一の符号を記し、重複説明を省略する。

[0017] <理論的背景>

まず、行動制御システム及び方法の理論的背景について説明する。

[0018] [問題設定]

任意の隊列形成を初期隊列形成状態として、ロボット同士が接したままの状態を維持しつつ目的とする任意の隊列形成状態である目的隊列形成状態への隊列を移動させる隊列制御を、多数のロボットが協調して行う任務を、例えば図1に例示するような、互いに接する面同士をスライドさせて移動して

いくことが可能な立方体型のロボットの制御を想定して実現する。この隊列制御は、図2に示すように、壁で区切られた部屋（ただし図中、壁を省略する）において、初期位置における隊列から目標位置における隊列への変形を、複数のロボットの移動によって実現するものである。

[0019] ロボットについては、例えば図1に示すように、ロボットの周囲縦横高さ方向（以下「上下左右前後方向」ともいう）6マスのうち1つに他のロボットが存在している（1つの面を他ロボットと共有している）状態を維持しながら移動をするものとする。この手法では1つのロボット自身が、一個のロボットのサイズ分の距離を移動することで、一回の動作の移動量を正確に測ることができるというメリットがある。また、1つの面を共有する隣り合うロボットとの相対的な位置を計測しあうことで、ロボットの群れ全体の中の各ロボットの位置も容易に知ることができる。このため、ロボットの移動量の誤差によって、隊列が崩れるといった問題を起こしにくく、また、各ロボットの位置を把握するために付加的な位置計測用の装備を備えずとも位置の把握が可能である。また、複数のロボットを連結したように、同時に複数のロボットを移動させていくことが可能である。なお、ロボットは、隣の位置に他のロボットが存在しているか否か、障害物があるか否か、そして、自身が目標位置上にいるかどうかを知ることができるものとする。

[0020] 任務を行うロボットは、 p 個（ $p \geq 12 = 4 \times 3$ ）であり、各ロボットは、隣接するロボットと一面以上を共有しつつ、三次元空間におけるX-Y-Z軸方向に移動可能とする。本発明では、ロボットは図4の右図に示すような4つのロボットで構成されるロボット群を最小単位（ロボット単位）として移動を実現するので、ロボットの総数 p は4の倍数とする。

[0021] 図1の各立方体は、それぞれのロボットの位置を示すものである。各立方体にはロボットは一個しか存在することができない。それぞれのロボットは、移動しようとする方向に障害物か他のロボットがある場合には、静止をするものと仮定する。なお、ロボットが存在する立方体状の空間をマス、又は、格子ともいう。図2において、色が塗りつぶされたマスはロボットが存

在する位置を示す。図2（A）のロボットが存在する位置はロボットの初期位置の集合（初期隊列形成状態）を示し、図2（C）のロボットが存在する位置はロボットの目標位置の集合（目的隊列形成状態）を示す。図2（B）に示すように、目標位置の集合と初期位置の集合は接している。目標位置の集合で表される領域を目標隊列エリアともいう。このように、各初期位置及び各目標位置は、それぞれ縦横高さ方向の少なくとも何れかの方向において他の初期位置及び目標位置と隣接し、ロボットの初期位置及び目標位置での隊列形状はそれぞれ一塊の任意の形状である。

[0022] なお、初期隊列形成状態と接しない位置を目的隊列形成状態としたい場合には、初期隊列形成状態と目的隊列形成状態との間にそれぞれ直前の隊列形成状態に隣接するような中間隊列形成状態を複数設定し、時間的に隣接する隊列形成状態をそれぞれ初期隊列形成状態と目的隊列形成状態として上述の隊列形成を行うことを繰り返すことで最終的に目的隊列形態に変形させることができる。

[0023] [ロボットの座標設定]

それぞれのロボット i （ i はロボット番号を表す $i=0, 1, 2, 3, \dots, p-1$ ）の位置を $(Xr[i], Yr[i], Zr[i])$ とし、初期位置を $(Xr0[i], Yr0[i], Zr0[i])$ とし、目標位置を $(Xre[i], Yre[i], Zre[i])$ とするとき、本問題は、初期位置に配置されたロボットが、目標位置まで移動するための行動計画を求めることと定義できる。ロボットの初期位置 $(Xr0[i], Yr0[i], Zr0[i])$ の集合を s 、目標位置 $(Xre[i], Yre[i], Zre[i])$ の集合を g とする。

[0024] [任務空間の定義]

i をロボット番号としたとき、ロボット i の各状態（ロボットの位置と行動）は離散値で表現される。部屋を X, Y, Z の直交座標系からなる3次元空間で表すと、 X 軸、 Y 軸、 Z 軸をそれぞれ離散化表現した値により各位置を表現する。つまり、部屋（3次元空間）は格子で区切られ、各格子が各位置に対応する。また、各格子において、障害物の「ある／なし」が予め設定されている。

[0025] [動作の定義]

例えば、ロボットである行動主体は部屋に配置されている各ロボットである。ロボット i (i はロボット番号)の行動 a は、静止、縦横高さ方向への1格子分の移動、の計7種類のうちの何れかを取る。例えば、 $a \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ として、

0: 静止

1: 三次元空間内でX軸正方向に1格子だけ移動する

2: 三次元空間内でY軸正方向に1格子だけ移動する

3: 三次元空間内でX軸負方向に1格子だけ移動する

4: 三次元空間内でY軸負方向に1格子だけ移動する

5: 三次元空間内でZ軸正方向に1格子だけ移動する

6: 三次元空間内でZ軸負方向に1格子だけ移動する

とする。

[0026] [探索計算上の問題点]

このような任務環境における状態空間は、ロボット数 $\times 3$ の次元数の状態を持ち、かつ選択可能な行動数は、ロボットの行動(=7通り)のロボット数乗だけ存在する。例えば、ロボット数が50で、部屋の縦横高さ方向の格子数がそれぞれ20であるとするれば状態数は20の150乗個にもなり、探索計算に要する資源の量は膨大なものとなる。さらにロボット数が1個増えるごとに、その状態数は8000倍増加していくことになる。[問題設定]の項で説明したように、ロボット同士が接しているという拘束条件を取り入れる場合、ロボットのお互いの移動を考慮したうえで探索計算を行わなければならないために、根本的な計算量の削減は難しく、複数のロボットを使用する場合の大きな問題となっている。

[0027] [参考文献1におけるヘテロジニアス隊列制御における特徴]

参考文献1におけるヘテロジニアス隊列制御では、上述の計算負荷の問題を解決するための方策の1つとして、ボイド制御の考え方を導入している。また、[問題設定]で述べたような隊列変形の問題を克服するために8マスロボット単位の考え方も導入している。

[0028] まず、ボイド制御について説明する。ここでいうボイドとは、あるロボットが別の位置に移動した後に、元いた位置にできる空隙のことである。別の言い方をすると、ボイドとは、ロボットの移動する方向と反対の方向に移動する仮想的な存在である。こうした群ロボットの隊列形成問題においては、複数のロボットの動作に着目するがゆえに、その探索計算量が爆発してしまうが、視点を変えて、ボイドの動きに着目すれば、多数のロボットの動作計画の問題を単一のボイドの動作計画として考えることができ、探索計算負荷の軽減に適している。ロボットの移動に伴ってボイドが移動していく様子を示す図を図3に示す。しかし、参考文献1では、フルに充填された8マスロボットの構造を採用しているために、ロボットの移動のためにボイドを構造内に意図的に生成しなければならない、そのため、隣接していないロボット同士の行き来には不自由な点が多かった。そのため、隊列の全体形状変形の際に、同時に各ロボットを目標位置まで到達させるための移動を同時に行いにくかった。

[0029] [参考文献1] Kawano, H., “Tunneling-Based Self-Reconfiguration of Heterogeneous Sliding Cube-Shaped Modular Robots in Environments with Obstacles”, 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.825-832, May 2017, Singapore.

[0030] [周囲に空隙を有するロボット単位の導入]

そこで本発明では、周囲に空隙を有するロボット単位を隊列の基本構成要素とし、隊列はこのロボット単位が複数接続することで構成され、ロボットは、このロボット単位を維持しつつ移動を行うこととする。例えば、図4に示すように、4つの隣接したロボットを1つの単位（ロボット単位）とし、ロボットは、このロボット単位を維持しつつ移動を行う。言い換えると、4個ごとに1つのロボット単位を構成し、1つのロボット単位を構成する4個のロボットは隣接した状態を維持しつつ移動を行う。ロボット単位の集団は、互いにロボット単位ごとに少なくとも一面を共有し、接しながら移動するように制御される。つまり、接続性を保ったまま隊列変形を行うこととす

る。また、同じロボット単位に所属する4つのロボットは同一（ホモジニアス）であるとする。つまり、同じロボット単位内では、どのロボットが単位内のどの位置にあるかは問わないものとする。

- [0031] 図4の例に限らず、ロボット単位は以下の条件を満たすよう構成されていればよい。すなわち、ロボット単位は、（1）三次元の直交座標系で各軸方向に長さ M （ $M \geq 2$ 、ただし、ロボット1個の長さを長さ1とする）を有する立方体形状の空間（以降この空間をメタモジュールとする。）内の部分構造であり（言い換えれば、ロボット単位はメタモジュールの一部を占め）、（2）当該メタモジュール内のロボット単位に含まれるロボットの数と、当該メタモジュール内のロボット単位以外の部分（すなわち空隙）の数とが等しく、（3）各軸方向に M 個のロボットが隣接する構造を含む。例えば、図4に例示するロボット単位は、（1）各軸方向の長さ $M=2$ とした計8マスの立方体からなるメタモジュールの部分構造であり、（2）ロボット単位内のロボットの数が4個、メタモジュール内の空隙の数が4個と等しく、（3）各軸方向において2個のロボットが隣接する構造が含まれている。

- [0032] このようなロボット単位を1つの単位とした移動を行う理由は、各ロボット単位の周囲（メタモジュールの内部）にある複数の空隙空間を、他のロボット単位に属するロボットが通過することができ、それにより、隣接していないロボット単位内に属するロボット同士が行き来することが容易である点である。また、各ロボット単位の周囲（メタモジュールの内部）にある複数の空隙空間を、他のロボット単位に属するロボットが通過する際の接続性の維持も容易である。すなわちこれは、隊列形態の維持を考量しなければならない各ロボットの動作の決定において、ロボット同士の接続を考慮するための計算負荷を軽減することにつながるからである。このように、本発明は、ロボット単位が周囲に空隙を有するような構成を基本単位とすることにより、計算負荷の削減を実現することを特徴とするものである。以後の説明では、ロボット単位の一例として、図4に示す4個のロボットからなる構造をロボット単位とする場合について説明するが、 M^3 個分の大きさのメタモジュー

ル内で上述の（１）～（３）の条件を満たすよう構成されたロボット単位であれば同様の効果を得ることができる。

[0033] ここでは４個のロボットがなすロボット単位が１つのマスの単位（本実施形態では、以下、この単位を「マス単位」又は「位置単位」ともいう）であると、１つのマス単位を一状態として取り得るロボット単位位置の集合からなる状態のうち、初期状態を集合 S 、目標状態を集合 G とする。なお、以下では、集合 S を、初期位置の集合 S 又は初期位置 S と呼ぶこともある。同様に、集合 G を、目標位置の集合 G 又は目標位置 G と呼ぶこともある。あるロボット単位 j の位置を $(Xr_u[j], Yr_u[j], Zr_u[j])$ ($j=0, 1, 2, \dots, j_max-1$) としたとき、そのロボット単位 j 内のロボットを $j1, j2, j3, j4$ とすれば、以下のようになる。

[0034] $Xr[j1] = 2 \times Xr_u[j]$
 $Yr[j1] = 2 \times Yr_u[j] + 1$
 $Zr[j1] = 2 \times Zr_u[j]$
 $Xr[j2] = 2 \times Xr_u[j] + 1$
 $Yr[j2] = 2 \times Yr_u[j]$
 $Zr[j2] = 2 \times Zr_u[j]$
 $Xr[j3] = 2 \times Xr_u[j]$
 $Yr[j3] = 2 \times Yr_u[j]$
 $Zr[j3] = 2 \times Zr_u[j]$
 $Xr[j4] = 2 \times Xr_u[j]$
 $Yr[j4] = 2 \times Yr_u[j]$
 $Zr[j4] = 2 \times Zr_u[j] + 1$

[0035] ここで、 j_max はロボット単位の総数、すなわち $j_max=p/4$ であり、 j はロボット単位を特定するIDに相当するものである。

[0036] なお、各ロボット i が所属するロボット単位 j は隊列制御のどの時刻においても不変である。また、各ロボット単位 j の初期位置を $(Xr_u0[j], Yr_u0[j], Zr_u0[j])$ とし、目標位置を $(Xr_ue[j], Yr_ue[j], Zr_ue[j])$ とする。

[0037] 以下、ロボット単位に属するロボットを移動させることを、ロボット単位を移動させると略記することもある。

[0038] このように、4個のロボットにより構成されるロボット単位で移動の制御を行うことにより、8個のロボットにより構成されるロボット単位で移動の制御を行っていた従来よりも少ないステップ数で隊列の変形が可能となる。

[0039] [ヘテロジニアスロボット隊列制御]

初期位置 ($Xr_u0[j], Yr_u0[j], Zr_u0[j]$) にある各ロボット単位 j の集合 S により形成される初期位置における隊列から、目標位置 ($Xr_ue[j], Yr_ue[j], Zr_ue[j]$) にある各ロボット単位 j の集合 G により形成される目標位置における隊列へ各ロボット単位を移動させるヘテロジニアスロボット隊列制御の方法について以下説明していく。

[0040] ある時刻において、ロボット単位 j の目標位置 ($Xr_ue[j], Yr_ue[j], Zr_ue[j]$) が空隙のままであり、かつ目標位置 ($Xr_ue[j], Yr_ue[j], Zr_ue[j]$) に隣接するロボット単位の位置内にロボット単位 j' に属するロボットが4つ存在しているとする (図5 (A))。この場合、 p 個のロボットからなる隊列内には非接続な箇所はなく、かつ各ロボット単位内には、ロボットが通過可能な空隙が4つ用意されているため、ロボット構造内のある位置に存在するロボット単位 j に属するロボット4つが、ロボット構造内の空隙を伝って、ロボット単位 j' 内の空隙に移動することは可能である (図5 (B)、図5 (C))。そして、4つの空隙がロボット単位 j に属するロボットによって埋められた状態のロボット位置 j' から、隣接する位置 ($Xr_ue[j], Yr_ue[j], Zr_ue[j]$) にロボット単位 j に属する4つのロボットを排出して、目標位置 ($Xr_ue[j], Yr_ue[j], Zr_ue[j]$) にて、ロボット単位 j の基本形状を形成させることも可能である (図5 (D))。

[0041] ここで、注意しなければならないのは、あるロボット単位 j が目標位置の集合 G 内へ入ろうとしている時点で、ロボット単位 j の目標位置が、すでに別のロボット単位 j' によって占有されている場合であり、ロボット単位 j' の本来の目標位置が、空隙のままである場合である (図6 (A))。この場合、

ロボット単位 j をロボット単位 j' の位置に移動させ、ロボット単位 j' を追い出し、さらにロボット単位 j' を本来の位置に移動させなければならないが、図6に示すように、ロボット単位 j に属する4つのロボットを、ロボット単位 j' に隣接するロボット単位 j_n のうちの一つであるロボット単位 j_k ($k=1, \dots, n$)の中の周囲に存在する4つの空隙位置に移動させ(図6(B))、続いて、ロボット単位 j' に所属するロボットとロボット単位 j に所属するロボットの位置を入れ替える(図6(C))。その後、ロボット単位 j' に所属するロボットをロボット単位 j' の周りにある空隙位置に移動させ(図6(D))、その後、ロボット単位 j' のロボットを目標位置に移動させる。

[0042] 以上に述べた制御を、全てのロボット単位が目標位置につくまで繰り返し行えば、ヘテロ隊列制御が完了する。この制御において、従来必要であったロボット同士の位置入れ替え作業は、上記のロボット単位 j' に所属するロボットとロボット単位 j に所属するロボットの位置を入れ替える作業において代替されている。以上の手法によれば、全てのロボット単位について、初期位置から目標位置に至るまでに必要な移動量は、入れ替えがなかった場合の移動量と同程度であり、かつそのほかの移動は必要としない。すなわち、本手法により、隊列の全体変形とロボット位置入れ替えが同時に行われている。

[0043] このように、全体の形状の変形動作と変形後のロボット位置入れ替えを別個のプロセスとせずに行うことで、隊列制御動作にかかる時間を短縮することができる。

[0044] ここで、従来手法では、初期位置 S にある各ロボット単位を目標位置への移動を開始する時刻については、1つ前に目標位置への移動を開始したロボット単位が、目標位置にたどり着いた時刻の後にする手法(ロボット単位が1つずつ移動する手法)を採用していたが、ロボット構造内の4マスロボット単位のもたらず空隙をフルに使用すれば、複数のロボット単位を同時に目標位置まで移動させることも可能である。ここで、移動を開始しようとしているロボット単位が、1つ前に移動を開始したロボット単位の開始時刻から、一定時間内に移動を開始することができれば、全体の変形に要する時間を、

ロボット単位数の一乗に比例するものにすることができる。

[0045] そのための手法を述べる。ここで、初期位置Sと目標位置Gは接しているものとし、目標位置Gに接している初期位置S内のロボット単位の位置を接続位置Gate_S (X_Gate , Y_Gate , Z_Gate) とし、全てのロボット単位は、接続位置Gate_Sを経由して、目標位置G内に入っていくものとする。ロボット単位が移動を開始する順番としては、接続位置Gate_Sからのマンハッタン距離 $\delta(j)$ の大きいものから優先的に移動を開始させるものとする。さらに、ロボット単位が位置の入れ替えを行うときは、位置の入れ替えを行うロボット単位の後続のロボット単位はすべて2時間ステップ以上だけ、動作を停止する。

[0046] また、移動を開始しようとしている制御対象物単位の δ 値を $\delta(j)$ とし、1つ前に移動を開始した制御対象物単位の初期位置の δ 値を $\delta(j-1)$ とし、 α を2以上の正の整数とし、 $t_w = \delta(j-1) - \delta(j) + \alpha$ とし、移動を開始しようとしている制御対象物単位は、1つ前に移動を開始した制御対象物単位の移動開始時刻から、 t_w 時間ステップ後に移動を開始する。すなわち、移動を開始しようとしている制御対象物単位が、1つ前に移動を開始した制御対象物単位の初期位置と δ 値が同じ場合は、移動を開始しようとしている制御対象物単位は、1つ前に移動を開始した制御対象物単位の移動開始時刻から、 α 時間ステップ後に移動を開始する。移動を開始しようとしている制御対象物単位の δ 値が、1つ前に移動を開始した制御対象物単位の初期位置の δ 値よりも1だけ小さい場合は、移動を開始しようとしている制御対象物単位は、1つ前に移動を開始した制御対象物単位の移動開始時刻から、 $\alpha + 1$ 時間ステップ後に移動を開始する。例えば $\alpha = 2$ とすることで、移動を行う各制御対象物単位は、互いにちょうど1つ分の制御対象物単位分の距離を開けつつ、同時に移動をすることになる。

[0047] 以上の方法を、分散制御方式でのアルゴリズムで実現する移動ロボット及び移動ロボットの制御方法の一実施形態について以下説明する。

[0048] <第一実施形態>

以下、第一実施形態の移動ロボット及び移動ロボットの制御方法について

説明する。

- [0049] 移動ロボットは、図 16 に示すように、位置距離計算命令送信部 1、位置距離計算命令転送部 2、返信位置距離計算命令送信部 3、方向記憶部 4、返信位置距離計算命令転送部 5、動作時刻告知命令送信部 6、動作時刻告知命令転送部 7、第一移動部 8、移動開始命令送信部 9、移動開始命令転送部 10、第二移動部 11、第三移動部 12、判定部 13、第四移動部 14、第五移動部 15、待ち命令送信部 16 及び待ち命令転送部 17 を例えば備えている。
- [0050] 移動ロボットの制御方法は、移動ロボットの各部が、例えば図 17 及び以下に説明するステップ S 1 からステップ S 17 の処理を行うことにより実現される。
- [0051] ステップ S 1 からステップ S 5 の処理は、初期位置 S の隊列構造を把握するための処理である。ステップ S 6 からステップ S 17 の処理は、ロボット単位を移動するための処理である。
- [0052] まず、接続位置 Gate_S にあるロボット単位 j_root にユーザーから変形開始命令が送信される。変形開始命令には、各ロボット単位の目標位置 G についての情報である隊列形態情報が含まれるとする。
- [0053] [位置距離計算命令送信部 1]
- 変形開始命令を受信したロボットが接続位置 Gate_S にあるロボット単位 j_root である場合には、位置距離計算命令送信部 1 は、それぞれ所定の初期値に設定された、接続位置からの相対位置と位置距離計算命令の送信転送回数とを含む位置距離計算命令を隣接するロボット単位に送信する（ステップ S 1）。
- [0054] 以下、位置距離計算命令を位置距離計算命令 MANHATTAN_COM、相対位置を相対位置 (Xr, Yr, Zr)、送信転送回数を送信転送回数 N_manhattan と表記する場合もある。
- [0055] 例えば、相対位置 (Xr, Yr, Zr) の初期値は (0, 0, 0) であり、送信転送回数 N_manhattan の初期値は 0 である。

[0056] [位置距離計算命令転送部 2]

ロボット単位が、位置距離計算命令を受信した場合に、位置距離計算命令転送部 2 は、位置距離計算命令に含まれる送信転送回数をインクリメントし、位置距離計算命令を受信した方向に応じて位置距離計算命令に含まれる相対位置を更新し、インクリメントした送信転送回数及び更新した相対位置を含む位置距離計算命令を、位置距離計算命令を送信してきたロボット単位以外の、隣接するロボット単位に一度だけ転送する（ステップ S 2）。

[0057] なお、位置距離計算命令転送部 2 は、位置距離計算命令MANHATTAN_COMを自分に送信してきたロボット単位には転送をしない。これにより、位置距離計算命令MANHATTAN_COMが、ロボット構造内で何度も無限に送受信されることを防ぐことができる。

[0058] [返信位置距離計算命令送信部 3]

ロボット単位が、位置距離計算命令を最初に受信した場合に、返信位置距離計算命令送信部 3 は、位置距離計算命令を送信してきたロボット単位に、インクリメントした送信転送回数及び更新した相対位置を含む返信位置距離計算命令を送信する（ステップ S 3）。

[0059] 以下、返信位置距離計算命令を返信位置距離計算命令RETURN_MANHATTAN_COMと表記する場合もある。

[0060] 最初に位置距離計算命令MANHATTAN_COMを受信した際の送信転送回数N_manhattanの値が、このロボット単位のロボット単位j_rootからのマンハッタン距離となる。

[0061] [方向記憶部 4]

ロボット単位が、位置距離計算命令を最初に受信した場合に、方向記憶部 4 は、位置距離計算命令を送信してきたロボット単位の方角をroot方角として記憶する（ステップ S 4）。

[0062] 以後、各ロボットは、何か情報をロボット単位j_rootに対して送るときは、各自rootの方角に送信する。

[0063] [返信位置距離計算命令転送部 5]

ロボット単位が、返信位置距離計算命令を受信した場合に、返信位置距離計算命令転送部 5 は、方向記憶部 4 から読み込んだroot方向に受信した返信位置距離計算命令を転送する（ステップ S 5）。

[0064] 各返信位置距離計算命令を受信した各ロボットがステップ S 5 の処理を行うことにより、各返信位置距離計算命令は最終的にロボット単位 j_root に到達する。

[0065] [動作時刻告知命令送信部 6]

ロボット単位がロボット単位 j_root であり、全てのロボットが送信した返信位置距離計算命令を受信した場合には、動作時刻告知命令送信部 6 は、返信位置距離計算命令に含まれる相対位置に基づく各ロボット単位の位置に基づいて、各ロボット単位の移動開始時刻を決定し、移動開始時刻を含む動作時刻告知命令を隣接するロボット単位に送信する（ステップ S 6）。

[0066] 例えば、動作時刻告知命令送信部 6 は、各ロボット単位のマンハッタン距離を把握し、マンハッタン距離の大きい順に、各ロボット単位の目標位置 G への移動動作開始の順番と、各ロボット単位間の移動開始予定時刻を決定する。

[0067] 以下、動作時刻告知命令を動作時刻告知命令 START_TIME_COM と表記する場合もある。

[0068] 動作時刻告知命令 START_TIME_COM は、各ロボット単位の移動開始時刻についての情報を含んでいる。

[0069] [動作時刻告知命令転送部 7]

ロボット単位が、動作時刻告知命令を受信した場合に、動作時刻告知命令転送部 7 は、動作時刻告知命令を隣接するロボット単位に一度だけ転送する（ステップ S 7）。

[0070] 以下、動作時刻告知命令を動作時刻告知命令 START_TIME_COM と表記する場合もある。

[0071] 動作時刻告知命令 START_TIME_COM は、各ロボット単位の移動開始時刻についての情報を含んでいる。

[0072] このように、動作時刻告知命令START_TIME_COMは、位置距離計算命令MANHATTAN_COMと同様に各ロボット単位に伝播されていく。

[0073] [第一移動部 8]

ロボット単位が、最初に移動を開始するロボット単位であり、動作時刻告知命令を受信した場合に、第一移動部 8 は、接続位置に向けてロボットを移動させる（ステップ S 8）。

[0074] このようにして、動作時刻告知命令START_TIME_COMを受信したロボット単位のうち、最初に移動開始するロボット単位は、動作時刻告知命令START_TIME_COMを受信後に接続位置Gate_Sを通る目標位置Gへの移動動作を開始する。この際、最初に移動を開始するロボット単位j_1は、全てのロボット単位の中で最後に命令START_TIME_COMを受信することになるため、この方法で他のロボット単位が命令START_TIME_COMを受信漏れすることはない。

[0075] なお、移動を開始したロボット単位j_1は、最初に図 7 及び図 8 に示す動作でroot方向に移動する。以後は、ロボット単位j_1は、自分とともに 8 マスロボット単位をなすロボット単位にrootの方向を尋ねる命令ASK_T0_ROOT_COMを送信し、それに対する返信命令RETURN_T0_ROOTによって、root方向を知る。そして、root方向に移動する。この際、図 9 及び図 10 の動作が使用される。以後、ロボット単位j_1はロボット単位j_rootの位置（接続位置Gate_S）にたどり着くまでこれを繰り返す。

[0076] [移動開始命令送信部 9]

ロボット単位の移動開始後所定の時間が経過した場合に、移動開始命令送信部 9 は、次に移動するロボット単位宛ての移動開始命令を隣接するロボット単位に送信する（ステップ S 9）。

[0077] 以下、移動開始命令を移動開始命令MOVE_STRAT_COMと表記する場合もある。

[0078] 例えば、ロボット単位j_1は、移動開始後所定の時間（次のロボット単位の移動開始時刻までの時間差）がたったら、次に接続位置Gate_Sを通る目標位置Gへの移動を開始する予定のロボット単位j_2に向けて、移動開始命令MOVE_

STRAT_COMを送信する。

[0079] [移動開始命令転送部 1 0]

ロボット単位が、移動開始命令を受信した場合に、移動開始命令転送部 1 0 は、移動開始命令を隣接するロボット単位に一度だけ転送する（ステップ S 1 0）。

[0080] 移動開始命令MOVE_START_COMは、移動開始命令MANHATTAN_COMと同様に各ロボット単位に伝播されていく。

[0081] [第二移動部 1 1]

ロボット単位が、移動開始命令を受信した場合に、第二移動部 1 1 は、接続位置に向けてロボットを移動させる（ステップ S 1 1）。

[0082] 例えば、移動開始命令MOVE_START_COMを受信したロボット単位j_2は、接続位置Gate_Sを通る目標位置Gへの移動を開始する。以降、またロボット単位j_2は、移動開始後所定の時間（次のロボット単位の移動開始時刻までの時間差）がたったら、次に接続位置Gate_Sを通る目標位置Gへの移動を開始する予定のロボット単位j_3に向けて、移動開始命令MOVE_STRAT_COMを送信する。

[0083] 初期位置Sにある全てのロボット単位が、接続位置Gate_Sを通る目標位置Gへの移動を開始するまで、ステップ S 9 からステップ S 1 2 の処理が繰り返し行われる。

[0084] なお、移動を開始した各ロボット単位j_k(k=1, 2, 3, ..., p/4)は、例えば、最初に図 7 及び図 8 に示す動作でroot方向に移動する。以後は、各ロボット単位は、例えば、自分とともに8マスロボット単位をなすロボット単位にrootの方向を尋ねる命令ASK_T0_ROOT_COMを送信し、それに対する返信命令RETURN_T0_ROOTによって、root方向を知る。そして、root方向に移動する。この際、図 9 及び図 1 0 の動作が使用される。以後、ロボット単位j_kはロボット単位j_rootの位置（接続位置Gate_S）にたどり着くまでこれを繰り返す。

[0085] [第三移動部 1 2]

ロボット単位が、接続位置に到達した場合に、第三移動部 1 2 は、ロボット単位j_rootから自身のロボット単位の目標位置と、自身のロボット単位の

目標位置に到達するためのパスとを取得し、取得した目標位置及びパスに従って自身のロボット単位を移動させる（ステップS 1 2）。

[0086] 例えば、接続位置Gate_Sにたどり着いた各ロボット単位j_kの第三移動部12は、ロボット単位j_rootに対し、自身のG内での目標位置とそれに至る最適パス（そこに至るG内のロボット単位位置が全て埋まっていて通過可能であるという前提の）の情報を要求する目標位置パス取得命令REQUEST_PATH_TO_GOAL_COMを送信し、それに対するロボット単位j_rootからの返信目標位置パス取得命令RETURN_PATH_TO_GOAL_COMを受信後、受信したパス情報に従い、自身のG内目標位置への移動を開始する。

[0087] [判定部13]

判定部13は、隣接し移動しようとする位置に他のロボット単位があるかどうかを判定する（ステップS 1 3）。

[0088] 例えば、各自のG内目標位置への移動を開始したロボット単位j_kは、まず自身と8マスロボット単位をなすロボット単位j_k' に対し、今からロボット単位j_kが移動しようとする方向に、すでに他のロボット単位があるかどうかを尋ねる隣接ロボット単位確認命令ASK_TARGET_EXIST_COMを送信する。

[0089] この場合、ロボット単位j_k' は、ロボット単位j_kの移動しようとする方向での隣接ロボット単位の有無を返信隣接ロボット単位確認命令RETURN_TARGET_EXIST_COMにてロボット単位j_kに返信する。

[0090] これにより、ロボット単位j_kの判定部13は、隣接し移動しようとする位置に他のロボット単位があるかどうかを判定することができる。

[0091] 隣接ロボット単位確認命令RETURN_TARGET_EXIST_COMを受信したロボット単位j_kは、今からロボット単位j_kが移動しようとする方向に、すでに他のロボット単位がある場合で、これから移動しようとしている位置が自身の目標位置ではない場合は、例えば図9又は図10の動作で移動を行う。

[0092] また、隣接ロボット単位確認命令RETURN_TARGET_EXIST_COMを受信したロボット単位j_kは、今からロボット単位j_kが移動しようとする方向に、すでに他のロボット単位がない場合は、図13又は図14に示す動作で移動を行う

。

[0093] [第四移動部 1 4]

隣接し移動しようとする位置に他のロボット単位があり、隣接し移動しようとする位置が自身のロボット単位の目標位置である場合には、第四移動部 1 4 は、自身のロボット単位を隣接し移動しようとする位置に移動させる（ステップ S 1 4）。

[0094] 例えば、今からロボット単位 j_k が移動しようとする方向に、すでに他のロボット単位がある場合で、これから移動しようとしている位置が自身の目標位置である場合は、ロボット単位 j_k の第四移動部 1 4 は、自身と 8 マスロボット単位をなすロボット単位 j_k' に対し、今からロボット単位 j_k が移動しようとする方向にすでにあるロボット単位に隣接するロボット単位の有無についての情報を尋ねる隣接ロボット単位確認命令 `ASK_GOAL_NEIGHBOR_COM` を送信する。ロボット単位 j_k' は、ロボット単位 j_k の目標位置にあるロボット単位に対し、隣接ロボット単位確認命令 `ASK_GOAL_NEIGHBOR_COM` を転送し、それを受信したロボット単位 j_k の目標位置にあるロボット単位は、自身に隣接するロボット単位の有無についての情報を返信する返信隣接ロボット単位確認命令 `RETURN_GOAL_NEIGHBOR_COM` を送信する。返信隣接ロボット単位確認命令 `RETURN_GOAL_NEIGHBOR_COM` は、ロボット単位 j_k' を経由し、ロボット単位 j_k まで転送される。

[0095] 返信隣接ロボット単位確認命令 `RETURN_GOAL_NEIGHBOR_COM` を受信したロボット単位 j_k の第四移動部 1 4 は、自身の目標位置に $a=3, 4, 6$ の方向で隣接するロボット単位がある場合は、その隣接するロボット単位の位置に移動し、移動先の位置から入れ替え動作（図 1 1 又は図 1 2）を使用して、目標位置へ移動する。返信隣接ロボット単位確認命令 `RETURN_GOAL_NEIGHBOR_COM` を受信したロボット単位 j_k の第四移動部 1 4 は、自身の目標位置に $a=3, 4, 6$ の方向で隣接するロボット単位がなく、かつ自身の目標位置に $a=1, 2, 5$ の方向で隣接するロボット単位がある場合は、その隣接するロボット単位の位置に移動し、移動先の位置から入れ替え動作（図 1 2）を使用して目標位置へ移動す

る。

[0096] 例えば、このようにして、第四移動部 1 4 は、自身のロボット単位を隣接し移動しようとする位置に移動させる。

[0097] [第五移動部 1 5]

ロボット単位が、ロボット単位 j_k が移動しようとする位置にある他のロボット単位である場合には、第五移動部 1 5 は、入れ替え動作によってロボット単位 j_k が移動しようとする位置に移動した後に、他のロボット単位を他のロボット単位の目標位置及びパスに従って移動させる（ステップ S 1 5）。

[0098] すなわち、ロボット単位 j_k によって入れ替えられた他のロボット単位は、以降、自身の目標位置への移動を再開する。

[0099] [待ち命令送信部 1 6]

ロボット単位が、他のロボット単位である場合には、待ち命令送信部 1 6 は、所定の待ち時間を含む待ち命令を隣接するロボット単位に送信する（ステップ S 1 6）。

[0100] 例えば、ロボット単位 j_k は、隣接ロボット単位確認命令 RETURN_GOAL_NEIGHBOR_COM を受信した後に、後続の移動中のロボット単位に対し、待ち命令 WAIT_COM を発信する。

[0101] 以下、待ち命令を待ち命令 WAIT_COM と表記する場合もある。

[0102] 所定の待ち時間は、例えば、ロボット単位 j_k が、図 1 1 又は図 1 2 に示す動作により自身の目標位置に隣接する位置から自身の目標位置に移動するために必要な時間 + β である。 β は 0 以上の所定の時間である。

[0103] [待ち命令転送部 1 7]

ロボット単位が、待ち命令を受信した場合に、待ち命令転送部 1 7 は、待ち命令に含まれる待ち時間だけ自身のロボット単位の移動を停止する共に、待ち命令を隣接するロボット単位に一度だけ転送する（ステップ S 1 7）。

[0104] すなわち、待ち命令 WAIT_COM を受信した移動中の各ロボット単位は、以降、命令により指定された時間だけ動作を停止する。また、待ち命令 WAIT_COM は、命令 MANHATTAN_COM のときと同様に各ロボット単位に伝播されていく。

[0105] このように、全体の形状の変形動作と変形後のロボット位置入れ替えを別個のプロセスとせずに同時に行うことで、隊列制御動作にかかる時間を短縮することができる。

[0106] <第二実施形態>

以下、第二実施形態の移動ロボット及び移動ロボットの制御方法について説明する。

[0107] 第一実施形態においては、ロボット単位位置の入れ替え動作は、目標位置G内において行っていたが、初期位置S内において行うことも可能である。

[0108] この場合は、移動中のロボット単位が、接続位置Gate_Sを通過して目標位置Gに入る順番が、接続位置Gate_Sからの各ロボット単位の目標位置のマンハッタン距離の小さい順になっていなければならない。しかし、ロボット単位jが移動を開始する際には、ロボット単位j_rootからのロボットjのマンハッタン距離が現時点でロボット単位jに隣接する初期位置S内ロボット単位のそれよりの大きいという条件を満たさなければならない。

[0109] ここで、ある時点で、ロボット単位j_kが次に接続位置Gate_Sを通過すべきロボット単位であるとする。この際、ロボット単位j_kからマンハッタン距離が大きくなるように隣接するロボット単位をたどっていき、その時点でS内で最終的にたどり着く位置にあるロボット単位をj_moveとし、まずロボット単位j_moveをロボット単位j_kの位置に移動させる。その後、ロボット単位j_moveとロボット単位j_kを図11又は図12の動作によって入れ替えを行い、その後、ロボット単位j_kを接続位置Gate_Sまで移動させる。それ以降は、第一実施形態の場合と同様に目標位置G内でのロボット単位j_kの移動が行われる。各ロボット単位の移動開始時間の設定は第一実施形態の場合と同様である。

[0110] 以上の方法を、分散制御方式でのアルゴリズムで実現する移動ロボット及び移動ロボットの制御方法の第二実施形態について以下説明する。

以上のロボット動作を、各ロボット単位内に実装された計算機と、隣接している各ロボット同士での通信を利用して実現するための分散型アルゴリズム

により実現する。

[0111] 移動ロボットは、図18に示すように、位置距離計算命令送信部1、位置距離計算命令転送部2、返信位置距離計算命令送信部3、方向記憶部4、返信位置距離計算命令転送部5、動作開始命令送信部18、動作開始命令転送部19、第一移動部20、第二移動部21及び第三移動部22を例えば備えている。

[0112] 移動ロボットの制御方法は、移動ロボットの各部が、例えば図19及び以下に説明するステップS1からステップS5及びステップS18からステップS22の処理を行うことにより実現される。

[0113] ステップS1からステップS5の処理は、初期位置Sの隊列構造を把握するための処理である。ステップS18からステップS22処理は、ロボット単位を移動するための処理である。

[0114] 以下、第一実施形態と異なる部分を中心に説明する。第一実施形態と同様の部分については説明を省略する。

[0115] まず、第一実施形態と同様にして、位置距離計算命令送信部1、位置距離計算命令転送部2、返信位置距離計算命令送信部3、方向記憶部4及び返信位置距離計算命令転送部5によるステップS1からステップS5の処理が行われる。

[0116] [動作開始命令送信部18]

ロボット単位が、ロボット単位j_rootであり、全てのロボットが送信した返信位置距離計算命令を受信した場合には、動作開始命令送信部18は、返信位置距離計算命令に含まれる相対位置に基づく各ロボット単位の位置に基づいて、各ロボット単位の移動開始時刻を決定する。G内目標位置のGate_Sからのマンハッタン距離の小さいものから $k=1, \dots, K$ として、kの小さい順番にG内に入っていくロボット単位j_kを決定する。ロボット単位j_kからたどっていける場所にあり接続位置からのマンハッタン距離が最も大きい位置にあるロボット単位j_moveを選択し、ロボット単位j_moveのGate_Sからのマンハッタン距離によってロボット単位j_moveの移動開始時刻を決定する、ロボット

単位j_moveの位置と、ロボット単位j_moveの位置からロボット単位j_kの位置への経路情報とを含む動作開始命令を隣接するロボット単位に送信する（ステップS18）。

[0117] 第一実施形態の動作時刻告知命令送信部6とは異なり、動作開始命令送信部18は、先に述べた初期位置S内でのロボット位置入れ替えを考慮して、ロボット単位j_rootでのロボット移動開始時刻の設定を行う。

[0118] 例えば、最初の動作開始命令START_MOVE_COMは、最初にGate_Sを通過すべきロボット単位j_1と、ロボット単位j_1からマンハッタン距離を大きくする方向にたどっていける場所にあり最遠のロボット単位j_moveと、ロボット単位j_moveからロボット単位j_1への経路情報を含んでいる。

[0119] ロボット単位j_rootの動作開始命令送信部18は、最初の動作開始命令START_MOVE_COMの送信後、所定時間(ロボット単位j_moveのGate_Sからのマンハッタン距離 δ により決まる移動開始時間間隔+入れ替え用の待ち時間)がたった後、2回目の動作開始命令START_MOVE_COMを送信する。2回目の動作開始命令START_MOVE_COMは、2回目に接続位置Gate_Sを通過すべきロボット単位j_2と、ロボット単位j_2からマンハッタン距離を大きくする方向にたどっていける場所にあり最遠のロボット単位j_moveと、ロボット単位j_moveからロボット単位j_2への経路情報を含んでいる。

[0120] このようにして、動作開始命令送信部18は、各ロボット単位j_k(k=1, ..., K)に対応する動作開始命令START_MOVE_COMを所定時間間隔で送信する。

[0121] [動作開始命令転送部19]

ロボット単位が、動作開始命令を受信した場合に、動作開始命令転送部19は、動作開始命令を隣接するロボット単位に一度だけ転送する（ステップS19）。

[0122] これにより、動作開始命令START_MOVE_COMは、位置距離計算命令MANHATTAN_COMと同様に各ロボット単位に伝播されていく。

[0123] [第一移動部20]

ロボット単位が、ロボット単位j_moveであり、動作開始命令を受信した場

合には、第一移動部20は、ロボット単位j_moveをロボット単位j_kの位置に移動させる（ステップS20）。

[0124] 例えば、最初の動作開始命令START_MOVE_COMを受信したロボット単位j_moveの第一移動部20は、ロボット単位j_moveをロボット単位j_1の位置に移動させる。

[0125] ロボット単位j_moveとロボット単位j_kの位置の入れ替え動作の例は、以下の通りである。ロボット単位j_moveが自身と入れ替えを行うロボット単位j_kとの8マスロボット単位をなす位置にたどり着いたら、ロボット単位j_moveの第一移動部20は、ロボット単位j_kに対し、ロボット単位j_kに隣接するロボット単位の有無についての情報を尋ねる隣接ロボット単位確認命令ASK_GOAL_NEIGHBOR_COMを送信する。ロボット単位j_kは、自身に隣接するロボット単位の有無についての情報を返信する返信隣接ロボット単位確認命令RETURN_GOAL_NEIGHBOR_COMを返信する。

[0126] 返信隣接ロボット単位確認命令RETURN_GOAL_NEIGHBOR_COMを受信したロボット単位j_moveの第一移動部20は、ロボット単位j_kにa=3, 4, 6の方向で隣接するロボット単位がある場合は、その隣接するロボット単位の位置移動し、移動先の位置から入れ替え動作（図11）を使用して、ロボット単位j_kの位置へ移動する。返信隣接ロボット単位確認命令RETURN_GOAL_NEIGHBOR_COMを受信したロボット単位j_moveの第一移動部20は、ロボット単位j_kにa=3, 4, 6の方向で隣接するロボット単位がなく、かつロボット単位j_kにa=1, 2, 5の方向で隣接するロボット単位がある場合は、その隣接するロボット単位の位置に移動し、移動先の位置から入れ替え動作（図12）を使用して、ロボット単位j_kの位置へ移動する。

[0127] [第二移動部21]

ロボット単位が、ロボット単位j_kである場合に、第二移動部21は、入れ替えによってロボット単位j_moveがロボット単位j_kの位置に移動した後に、ロボット単位j_kを接続位置に向けて移動させる（ステップS21）。

[0128] これにより、例えば、ロボット単位j_moveは、ロボット単位j_1の位置まで

移動したら、ロボット単位 j_1 との入れ替えを行い、入れ替え後のロボット単位 j_1 は、接続位置Gate_Sへの移動を開始する。

[0129] なお、移動を開始した各ロボット単位 j_k ($k=1, 2, 3, \dots, p/4$)は、例えば、最初に図9又は図10に示す動作でroot方向に移動する。以後は、各ロボット単位は、例えば、自分とともに8マスロボット単位をなすロボット単位にroot方向を尋ねる命令ASK_T0_ROOT_COMを送信し、それに対する返信命令RETURN_T0_ROOTによって、root方向を知る。そして、root方向に移動する(図9又は図10の動作を使用する)。以後、ロボット単位 j_k はロボット単位 j_root の位置(接続位置Gate_S)にたどり着くまでこれを繰り返す。

[0130] [第三移動部22]

ロボット単位が、接続位置に到達した場合に、第三移動部22は、ロボット単位 j_root から自身のロボット単位の目標位置と、自身のロボット単位の目標位置に到達するためのパスとを取得し、取得した目標位置及びパスに従って自身のロボット単位を移動させる(ステップS22)。

[0131] 例えば、接続位置Gate_Sにたどり着いた各ロボット単位 j_k の第三移動部22は、ロボット単位 j_root に対し、自身のG内での目標位置とそれに至る最適パス(そこに至るG内のロボット単位位置が全て埋まっているという前提の)の情報を要求する命令REQUEST_PATH_TO_GOAL_COMを送信し、それに対するロボット単位 j_root からの返信命令RETURN_PATH_TO_GOAL_COMを受信後、受信したパス情報に従い、自身のG内目標位置への移動を開始する。

[0132] このように、全体の形状の変形動作と変形後のロボット位置入れ替えを別個のプロセスとせずに同時に行うことで、隊列制御動作にかかる時間を短縮することができる。

[0133] <第三実施形態>

以下、第三実施形態の移動ロボット及び移動ロボットの制御方法について説明する。

[0134] [8マスロボット単位の導入]

4台のロボットがなすロボット単位を1つのマスの単位として扱ってきた

が、これと対をなす形で合わせて8マスのロボット単位を構成するための4マス単位を定義する(図15)。あるロボット単位jの位置を($Xr_u[j]$, $Yr_u[j]$, $Zr_u[j]$) ($j=0, 1, 2, \dots, j_max-1$)としたとき、そのロボット単位j内のロボットをj1, j2, j3, j4とすれば、以下ようになる。

$$\begin{aligned}
 [0135] \quad & Xr[j1] = 2 \times Xr_u[j] \\
 & Yr[j1] = 2 \times Yr_u[j] + 1 \\
 & Zr[j1] = 2 \times Zr_u[j] + 1 \\
 & Xr[j2] = 2 \times Xr_u[j] + 1 \\
 & Yr[j2] = 2 \times Yr_u[j] \\
 & Zr[j2] = 2 \times Zr_u[j] + 1 \\
 & Xr[j3] = 2 \times Xr_u[j] + 1 \\
 & Yr[j3] = 2 \times Yr_u[j] + 1 \\
 & Zr[j3] = 2 \times Zr_u[j] \\
 & Xr[j4] = 2 \times Xr_u[j] + 1 \\
 & Yr[j4] = 2 \times Yr_u[j] + 1 \\
 & Zr[j4] = 2 \times Zr_u[j] + 1
 \end{aligned}$$

[0136] なお、各ロボットiが所属するロボット単位jは隊列制御のどの時刻においても不変である。また、各ロボット単位jの初期位置を($Xr_u0[j]$, $Yr_u0[j]$, $Zr_u0[j]$)とし、目標位置を($Xr_ue[j]$, $Yr_ue[j]$, $Zr_ue[j]$)とする。

[0137] 第一実施形態と第二実施形態を組み合わせ、8マスロボット単位で構成されたロボット隊列を任意の隊列に変形させることができる。図15(B)のドットで示された4マスロボット単位をまず第一実施形態の方法で目標位置G内に移動させ、次に図15(B)の白で示された4マスロボット単位形態で整列させる。続いて、白で示された4マスロボット単位を第二実施形態体の方法で目標位置G内に移動させる。

[0138] ただし、最初のドットで示された4マスロボット単位の移動では、接続位置Gate_Sからのマンハッタン距離が近いものから優先的に目標位置Gへの移動を行っていく点と、続いての白で示された4マスロボット単位の移動では、

目標位置G内の接続位置Gate_Sからのマンハッタン距離が大きいものから順に接続位置Gate_Sを通過する点だけが第一実施形態及び第二実施形態とは異なる。他の点については、第一実施形態及び第二実施形態と同様である。

[0139] 第三実施形態の移動ロボットは、図20に示すように、位置距離計算命令送信部1、位置距離計算命令転送部2、返信位置距離計算命令送信部3、方向記憶部4、返信位置距離計算命令転送部5、動作時刻告知命令送信部6、動作時刻告知命令転送部7、第一移動部8、移動開始命令送信部9、移動開始命令転送部10、第二移動部11、第三移動部12、判定部13、第四移動部14、第五移動部15、待ち命令送信部16、待ち命令転送部17動作開始命令送信部18、動作開始命令転送部19、第一移動部20、第二移動部21及び第三移動部22を例えば備えている。

[0140] 移動ロボットの制御方法は、移動ロボットの各部が、例えば図21及び以下に説明するステップS1からステップS22の処理を行うことにより実現される。

[0141] 以下では、第一実施形態及び第二実施形態と異なる部分を中心に説明する。第一実施形態及び第二実施形態と同様の部分については説明を省略する。

[0142] まず、第一実施形態と同様にして、位置距離計算命令送信部1、位置距離計算命令転送部2、返信位置距離計算命令送信部3、方向記憶部4及び返信位置距離計算命令転送部5、動作時刻告知命令送信部6、動作時刻告知命令転送部7、第一移動部8、移動開始命令送信部9、移動開始命令転送部10、第二移動部11、第三移動部12、判定部13、第四移動部14、第五移動部15、待ち命令送信部16、待ち命令転送部17によるステップS1からステップS17の処理が行われる。

[0143] ただし、動作時刻告知命令送信部6は、各ロボット単位の移動開始時刻を、接続位置Gate_Sからのマンハッタン距離に近いロボット単位から優先的に目標位置Gへの移動を開始するように決定する（ステップS6）。

[0144] また、図15（B）のドットで示された4マスロボット単位は、目標位置Gにおいて、図15（B）の白で示された4マスロボット単位の位置にポジシ

ョンを取るとする。

[0145] その後、第二実施形態と同様にして、位置距離計算命令送信部 1、位置距離計算命令転送部 2、返信位置距離計算命令送信部 3、方向記憶部 4、返信位置距離計算命令転送部 5、動作開始命令送信部 18、動作開始命令転送部 19、第一移動部 20、第二移動部 21 及び第三移動部 22 によるステップ S 1 からステップ S 5 及びステップ S 18 からステップ S 22 の処理が行われる。

[0146] ただし、動作開始命令送信部 18 は、各ロボット単位の移動開始時刻を、目標位置 G 内の接続位置 Gate_S からのマンハッタン距離が大きいものから順に接続位置 Gate_S を通過するように決定する（ステップ S 18）。

[0147] なお、2 回目の、位置距離計算命令送信部 1、位置距離計算命令転送部 2、返信位置距離計算命令送信部 3、方向記憶部 4 及び返信位置距離計算命令転送部 5 によるステップ S 1 からステップ S 5 の処理は行われなくてもよい。この場合、1 回目の位置距離計算命令送信部 1、位置距離計算命令転送部 2、返信位置距離計算命令送信部 3、方向記憶部 4 及び返信位置距離計算命令転送部 5 によるステップ S 1 からステップ S 5 の処理の結果を用いて、第二実施形態と同様の、動作開始命令送信部 18、動作開始命令転送部 19、第一移動部 20、第二移動部 21 及び第三移動部 22 によるステップ S 18 からステップ S 22 の処理が行われる。

[0148] 第三実施形態においても、全体の形状の変形動作と変形後のロボット位置入れ替えを別個のプロセスとせずに行うことで、隊列制御動作にかかる時間を短縮することができる。

[0149] <プログラム及び記録媒体>

移動ロボットの各部における処理をコンピュータによって実現する場合、これらの装置の各部が有すべき機能の処理内容はプログラムによって記述される。そして、このプログラムをコンピュータで実行することにより、その各部の処理がコンピュータ上で実現される。

[0150] この処理内容を記述したプログラムは、コンピュータで読み取り可能な記

録媒体に記録しておくことができる。コンピュータで読み取り可能な記録媒体としては、例えば、磁気記録装置、光ディスク、光磁気記録媒体、半導体メモリ等どのようなものでもよい。

[0151] また、各部の処理は、コンピュータ上で所定のプログラムを実行させることにより構成することにしてもよいし、これらの処理の少なくとも一部をハードウェア的に実現することとしてもよい。

[0152] その他、この発明の趣旨を逸脱しない範囲で適宜変更が可能であることはいうまでもない。

符号の説明

- [0153]
- | | |
|----|---------------|
| 1 | 位置距離計算命令送信部 |
| 2 | 位置距離計算命令転送部 |
| 3 | 返信位置距離計算命令送信部 |
| 4 | 方向記憶部 |
| 5 | 返信位置距離計算命令転送部 |
| 6 | 動作時刻告知命令送信部 |
| 7 | 動作時刻告知命令転送部 |
| 8 | 第一移動部 |
| 9 | 移動開始命令送信部 |
| 10 | 移動開始命令転送部 |
| 11 | 第二移動部 |
| 12 | 第三移動部 |
| 13 | 判定部 |
| 14 | 第四移動部 |
| 15 | 第五移動部 |
| 16 | 命令送信部 |
| 17 | 命令転送部 |
| 18 | 動作開始命令送信部 |
| 19 | 動作開始命令転送部 |

2 0 第一移動部

2 1 第二移動部

2 2 第三移動部

請求の範囲

[請求項1]

移動ロボットは複数のロボット単位で構成されているとし、各ロボット単位の周囲には他のロボット単位を構成するロボットが移動可能な空隙があり、各ロボット単位には所定の初期位置及び所定の目標位置が定められており、上記所定の初期位置の集合と上記所定の目標位置の集合とは接しているとし、上記所定の初期位置の集合に含まれる位置であって上記所定の目標位置の集合に接している位置の1つを接続位置とし、上記移動ロボットは上記所定の初期位置から上記接続位置を通して上記所定の目標位置に移動するとして、

上記複数のロボット単位のそれぞれについて、当該ロボット単位が上記接続位置にあるロボット単位j_rootである場合に、それぞれ所定の初期値に設定された、上記接続位置からの相対位置と位置距離計算命令の送信転送回数とを含む位置距離計算命令を隣接するロボット単位に送信する位置距離計算命令送信部と、

上記位置距離計算命令を受信した場合に、上記位置距離計算命令に含まれる送信転送回数をインクリメントし、上記位置距離計算命令を受信した方向に応じて上記位置距離計算命令に含まれる相対位置を更新し、上記インクリメントした送信転送回数及び上記更新した相対位置を含む位置距離計算命令を、上記位置距離計算命令を送信してきたロボット単位以外の、隣接するロボット単位に一度だけ転送する位置距離計算命令転送部と、

上記位置距離計算命令を最初に受信した場合に、上記位置距離計算命令を送信してきたロボット単位に、上記インクリメントした送信転送回数及び上記更新した相対位置を含む返信位置距離計算命令を送信する返信位置距離計算命令送信部と、

上記位置距離計算命令を最初に受信した場合に、上記位置距離計算命令を送信してきたロボット単位の方角をroot方向として記憶する方向記憶部と、

上記返信位置距離計算命令を受信した場合に、上記方向記憶部から読み込んだroot方向に上記受信した返信位置距離計算命令を転送する返信位置距離計算命令転送部と、

上記複数のロボット単位のそれぞれについて、当該ロボット単位が上記ロボット単位j_rootであり、全てのロボットが送信した返信位置距離計算命令を受信した場合に、上記返信位置距離計算命令に含まれる相対位置に基づく各ロボット単位の位置に基づいて、各ロボット単位の移動開始時刻を決定し、上記移動開始時刻を含む動作時刻告知命令を隣接するロボット単位に送信する動作時刻告知命令送信部と、

上記動作時刻告知命令を受信した場合に、上記動作時刻告知命令を隣接するロボット単位に一度だけ転送する動作時刻告知命令転送部と、

最初に移動を開始するロボット単位であり上記動作時刻告知命令を受信した場合に、上記接続位置に向けてロボットを移動させる第一移動部と、

移動開始後所定の時間が経過した場合に、次に移動するロボット単位宛ての移動開始命令を隣接するロボット単位に送信する移動開始命令送信部と、

上記移動開始命令を受信した場合に、上記移動開始命令を隣接するロボット単位に一度だけ転送する移動開始命令転送部と、

上記移動開始命令を受信した場合に、上記接続位置に向けてロボットを移動させる第二移動部と、

上記接続位置に到達した場合に、上記ロボット単位j_rootから自身のロボット単位の目標位置と、上記自身のロボット単位の目標位置に到達するためのパスとを取得し、取得した目標位置及びパスに従って自身のロボット単位を移動させる第三移動部と、

隣接し移動しようとする位置に他のロボット単位があるかどうかを判定する判定部と、

隣接し移動しようとする位置に他のロボット単位があり、上記隣接し移動しようとする位置が自身のロボット単位の目標位置である場合には、自身のロボット単位を上記隣接し移動しようとする位置に移動させる第四移動部と、

上記複数のロボット単位のそれぞれについて、当該ロボット単位が上記他のロボット単位である場合に、上記自身のロボット単位が上記隣接し移動しようとする位置に移動した後に、上記他のロボット単位を上記他のロボット単位の目標位置及びパスに従って移動させる第五移動部と、

上記複数のロボット単位のそれぞれについて、当該ロボット単位が上記他のロボット単位である場合に、所定の待ち時間を含む待ち命令を隣接するロボット単位に送信する待ち命令送信部と、

上記待ち命令を受信した場合に、上記待ち命令に含まれる待ち時間だけ自身のロボット単位の移動を停止すると共に、上記待ち命令を隣接するロボット単位に一度だけ転送する待ち命令転送部と、

を含む、

移動ロボット。

[請求項2]

移動ロボットは複数のロボット単位で構成されているとし、各ロボット単位の周囲には他のロボット単位を構成するロボットが移動可能な空隙があり、各ロボット単位には所定の初期位置及び所定の目標位置が定められており、上記所定の初期位置の集合と上記所定の目標位置の集合とは接しているとし、上記所定の初期位置の集合に含まれる位置であって上記所定の目標位置の集合に接している位置の1つを接続位置とし、上記移動ロボットは上記所定の初期位置から上記接続位置を通して上記所定の目標位置に移動するとして、

上記複数のロボット単位のそれぞれについて、当該ロボット単位が上記接続位置にあるロボット単位j_rootである場合に、それぞれ所定の初期値に設定された、上記接続位置からの相対位置と位置距離計算

命令の送信転送回数とを含む位置距離計算命令を隣接するロボット単位に送信する位置距離計算命令送信部と、

上記位置距離計算命令を受信した場合に、上記位置距離計算命令に含まれる送信転送回数をインクリメントし、上記位置距離計算命令を受信した方向に応じて上記位置距離計算命令に含まれる相対位置を更新し、上記インクリメントした送信転送回数及び上記更新した相対位置を含む位置距離計算命令を、上記位置距離計算命令を送信してきたロボット単位以外の、隣接するロボット単位に一度だけ転送する位置距離計算命令転送部と、

上記位置距離計算命令を最初に受信した場合に、上記位置距離計算命令を送信してきたロボット単位に、上記インクリメントした送信転送回数及び上記更新した相対位置を含む返信位置距離計算命令を送信する返信位置距離計算命令送信部と、

上記位置距離計算命令を最初に受信した場合に、上記位置距離計算命令を送信してきたロボット単位の方角をroot方角として記憶する方角記憶部と、

上記返信位置距離計算命令を受信した場合に、上記方角記憶部から読み込んだroot方角に上記受信した返信位置距離計算命令を転送する返信位置距離計算命令転送部と、

上記複数のロボット単位のそれぞれについて、当該ロボット単位が上記ロボット単位 j_root であり、全てのロボットが送信した返信位置距離計算命令を受信した場合には、上記返信位置距離計算命令に含まれる相対位置に基づく各ロボット単位の位置に基づいて、各ロボット単位の移動開始時刻を決定し、 $k=1, \dots, K$ として、ロボット単位 j_k の移動開始時刻になった場合に、上記ロボット単位 j_k と、上記ロボット単位 j_k からたどっていける場所にあり上記接続位置からのマンハッタン距離が最も大きい位置にあるロボット単位 j_move と、上記ロボット単位 j_move の位置から上記ロボット単位 j_k の位置への経路情報

とを含む動作開始命令を隣接するロボット単位に送信する動作開始命令送信部と、

上記動作開始命令を受信した場合に、上記動作開始命令を隣接するロボット単位に一度だけ転送する動作開始命令転送部と、

上記ロボット単位j_moveについて、上記動作開始命令を受信した場合には、上記ロボット単位j_moveを上記ロボット単位j_kの位置に移動させる第一移動部と、

上記ロボット単位j_kについて、上記ロボット単位j_moveが上記ロボット単位j_kの位置に移動した後に、上記ロボット単位j_kを上記接続位置に向けて移動させる第二移動部と、

上記接続位置に到達した場合に、上記ロボット単位j_rootから自身のロボット単位の目標位置と、上記自身のロボット単位の目標位置に到達するためのパスとを取得し、取得した目標位置及びパスに従って自身のロボット単位を移動させる第三移動部と、

を含む、

移動ロボット。

[請求項3] 請求項1又は2の移動ロボットであって、

上記ロボット単位は三次元直交座標系で各軸方向に長さMを有する立方体形状の空間内の部分構造であり、上記立方体形状の空間内のロボット単位に含まれるロボットの数と上記立方体形状の空間内のロボット単位以外の部分の数とが等しく、上記ロボット単位は各軸方向にM個のロボットが隣接する構造を含む、

移動ロボット。

[請求項4] 移動ロボットは複数のロボット単位で構成されているとし、各ロボット単位の周囲には他のロボット単位を構成するロボットが移動可能な空隙があり、各ロボット単位には所定の初期位置及び所定の目標位置が定められており、上記所定の初期位置の集合と上記所定の目標位置の集合とは接しているとし、上記所定の初期位置の集合に含まれる

位置であって上記所定の目標位置の集合に接している位置の1つを接続位置とし、上記移動ロボットは上記所定の初期位置から上記接続位置を通して上記所定の目標位置に移動するとして、

上記接続位置にあるロボット単位j_rootの位置距離計算命令送信部が、それぞれ所定の初期値に設定された、上記接続位置からの相対位置と位置距離計算命令の送信転送回数とを含む位置距離計算命令を隣接するロボット単位に送信する位置距離計算命令送信ステップと、

上記位置距離計算命令を受信したロボット単位の位置距離計算命令転送部が、上記位置距離計算命令に含まれる送信転送回数をインクリメントし、上記位置距離計算命令を受信した方向に応じて上記位置距離計算命令に含まれる相対位置を更新し、上記インクリメントした送信転送回数及び上記更新した相対位置を含む位置距離計算命令を、上記位置距離計算命令を送信してきたロボット単位以外の、隣接するロボット単位に一度だけ転送する位置距離計算命令転送ステップと、

上記位置距離計算命令を最初に受信したロボット単位の返信位置距離計算命令送信部が、場合に、上記位置距離計算命令を送信してきたロボット単位に、上記インクリメントした送信転送回数及び上記更新した相対位置を含む返信位置距離計算命令を送信する返信位置距離計算命令送信ステップと、

上記位置距離計算命令を最初に受信したロボット単位の方向記憶部が、上記位置距離計算命令を送信してきたロボット単位の方向をroot方向として記憶する方向記憶ステップと、

上記返信位置距離計算命令を受信したロボット単位の返信位置距離計算命令転送部が、上記方向記憶部から読み込んだroot方向に上記受信した返信位置距離計算命令を転送する返信位置距離計算命令転送ステップと、

上記ロボット単位j_rootの動作時刻告知命令送信部が、全てのロボットが送信した返信位置距離計算命令を受信した場合には、上記返信

位置距離計算命令に含まれる相対位置に基づく各ロボット単位の位置に基づいて、各ロボット単位の移動開始時刻を決定し、上記移動開始時刻を含む動作時刻告知命令を隣接するロボット単位に送信する動作時刻告知命令送信ステップと、

上記動作時刻告知命令を受信したロボット単位の動作時刻告知命令転送部が、上記動作時刻告知命令を隣接するロボット単位に一度だけ転送する動作時刻告知命令転送ステップと、

最初に移動を開始するロボット単位の第一移動部が、上記動作時刻告知命令を受信した場合に、上記接続位置に向けてロボットを移動させる第一移動ステップと、

移動開始後所定の時間が経過したロボット単位の移動開始命令送信部が、次に移動するロボット単位宛ての移動開始命令を隣接するロボット単位に送信する移動開始命令送信ステップと、

上記移動開始命令を受信したロボット単位の移動開始命令転送部が、上記移動開始命令を隣接するロボット単位に一度だけ転送する移動開始命令転送ステップと、

上記移動開始命令を受信したロボット単位の第二移動部が、上記接続位置に向けてロボットを移動させる第二移動ステップと、

上記接続位置に到達したロボット単位の第三移動部が、上記ロボット単位j_rootから自身のロボット単位の目標位置と、上記自身のロボット単位の目標位置に到達するためのパスとを取得し、取得した目標位置及びパスに従って自身のロボット単位を移動させる第三移動ステップと、

ロボット単位の判定部が、隣接し移動しようとする位置に他のロボット単位があるかどうかを判定する判定ステップと、

ロボット単位の第四移動部が、隣接し移動しようとする位置に他のロボット単位があり、上記隣接し移動しようとする位置が自身のロボット単位の目標位置である場合には、自身のロボット単位を上記隣接

し移動しようとする位置に移動させる第四移動ステップと、

上記他のロボット単位であるロボット単位の第五移動部が、上記自身のロボット単位が上記隣接し移動しようとする位置に移動した後に、上記他のロボット単位を上記他のロボット単位の目標位置及びパスに従って移動させる第五移動ステップと、

上記他のロボット単位であるロボット単位の待ち命令送信部が、所定の待ち時間を含む待ち命令を隣接するロボット単位に送信する待ち命令送信ステップと、

上記待ち命令を受信したロボット単位の待ち命令転送部が、上記待ち命令に含まれる待ち時間だけ自身のロボット単位の移動を停止すると共に、上記待ち命令を隣接するロボット単位に一度だけ転送する待ち命令転送ステップと、

を含む、

移動ロボットの制御方法。

[請求項5]

移動ロボットは複数のロボット単位で構成されているとし、各ロボット単位の周囲には他のロボット単位を構成するロボットが移動可能な空隙があり、各ロボット単位には所定の初期位置及び所定の目標位置が定められており、上記所定の初期位置の集合と上記所定の目標位置の集合とは接しているとし、上記所定の初期位置の集合に含まれる位置であって上記所定の目標位置の集合に接している位置の1つを接続位置とし、上記移動ロボットは上記所定の初期位置から上記接続位置を通して上記所定の目標位置に移動するとして、

上記接続位置にあるロボット単位j_rootの位置距離計算命令送信部が、それぞれ所定の初期値に設定された、上記接続位置からの相対位置と位置距離計算命令の送信転送回数とを含む位置距離計算命令を隣接するロボット単位に送信する位置距離計算命令送信ステップと、

上記位置距離計算命令を受信したロボット単位の位置距離計算命令転送部が、上記位置距離計算命令に含まれる送信転送回数をインクリ

メントし、上記位置距離計算命令を受信した方向に応じて上記位置距離計算命令に含まれる相対位置を更新し、上記インクリメントした送信転送回数及び上記更新した相対位置を含む位置距離計算命令を、上記位置距離計算命令を送信してきたロボット単位以外の、隣接するロボット単位に一度だけ転送する位置距離計算命令転送ステップと、

上記位置距離計算命令を最初に受信したロボット単位の返信位置距離計算命令送信部が、上記位置距離計算命令を送信してきたロボット単位に、上記インクリメントした送信転送回数及び上記更新した相対位置を含む返信位置距離計算命令を送信する返信位置距離計算命令送信ステップと、

上記位置距離計算命令を最初に受信したロボット単位の方向記憶部が、上記位置距離計算命令を送信してきたロボット単位の方角をroot方角として記憶する方角記憶ステップと、

上記返信位置距離計算命令を受信したロボット単位の返信位置距離計算命令転送部が、上記方角記憶部から読み込んだroot方角に上記受信した返信位置距離計算命令を転送する返信位置距離計算命令転送ステップと、

上記ロボット単位j_rootの動作開始命令送信部が、全てのロボットが送信した返信位置距離計算命令を受信した場合には、上記返信位置距離計算命令に含まれる相対位置に基づく各ロボット単位の位置に基づいて、各ロボット単位の移動開始時刻を決定し、 $k=1, \dots, K$ として、ロボット単位j_kの移動開始時刻になった場合に、上記ロボット単位j_kと、上記ロボット単位j_kからたどっていける場所にあり上記接続位置からのマンハッタン距離が最も大きい位置にあるロボット単位j_moveと、上記ロボット単位j_moveの位置から上記ロボット単位j_kの位置への経路情報とを含む動作開始命令を隣接するロボット単位に送信する動作開始命令送信ステップと、

上記動作開始命令を受信したロボット単位の動作開始命令転送部が

、上記動作開始命令を隣接するロボット単位に一度だけ転送する動作開始命令転送ステップと、

上記ロボット単位j_moveの第一移動部が、上記動作開始命令を受信した場合には、上記ロボット単位j_moveを上記ロボット単位j_kの位置に移動させる第一移動ステップと、

上記ロボット単位j_kの第二移動部が、上記ロボット単位j_moveが上記ロボット単位j_kの位置に移動した後に、上記ロボット単位j_kを上記接続位置に向けて移動させる第二移動ステップと、

上記接続位置に到達したロボット単位の第三移動部が、上記ロボット単位j_rootから自身のロボット単位の目標位置と、上記自身のロボット単位の目標位置に到達するためのパスとを取得し、取得した目標位置及びパスに従って自身のロボット単位を移動させる第三移動ステップと、

を含む、

移動ロボットの制御方法。

[請求項6] 請求項1から3の何れかの移動ロボットの各部としてコンピュータを機能させるためのコンピュータ読み取り可能なプログラム。

[図1]

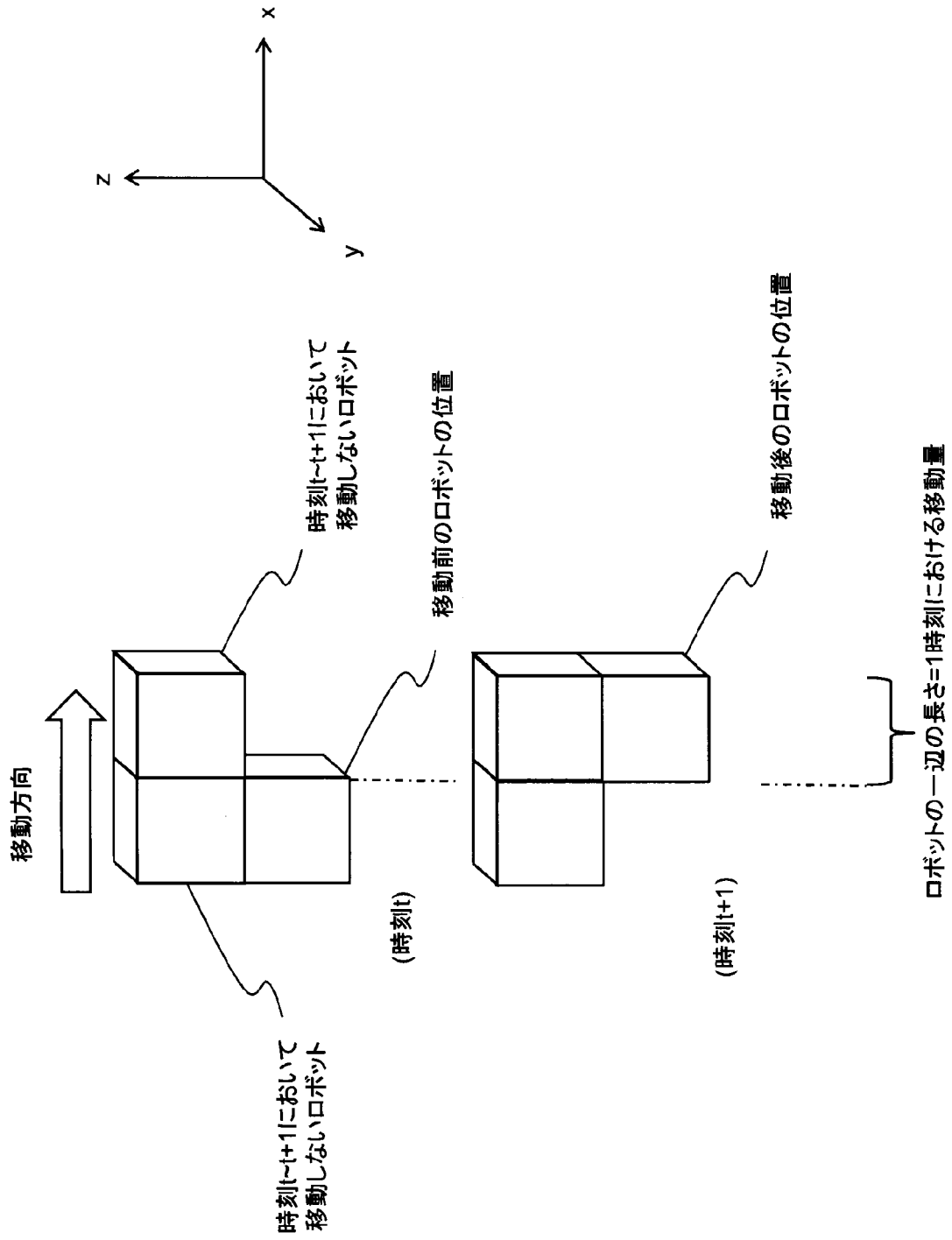


図1

[図2]

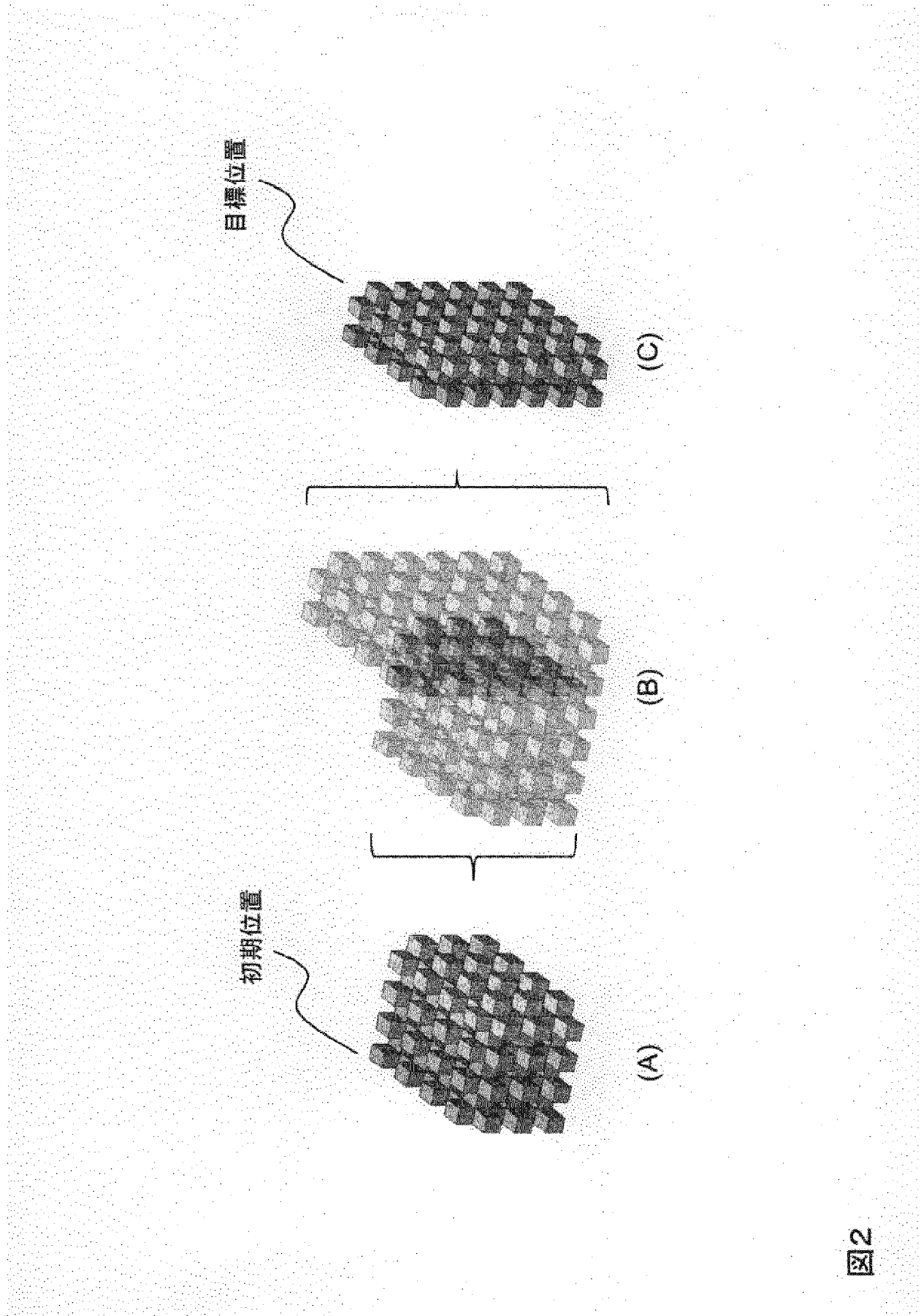


図2

[図3]

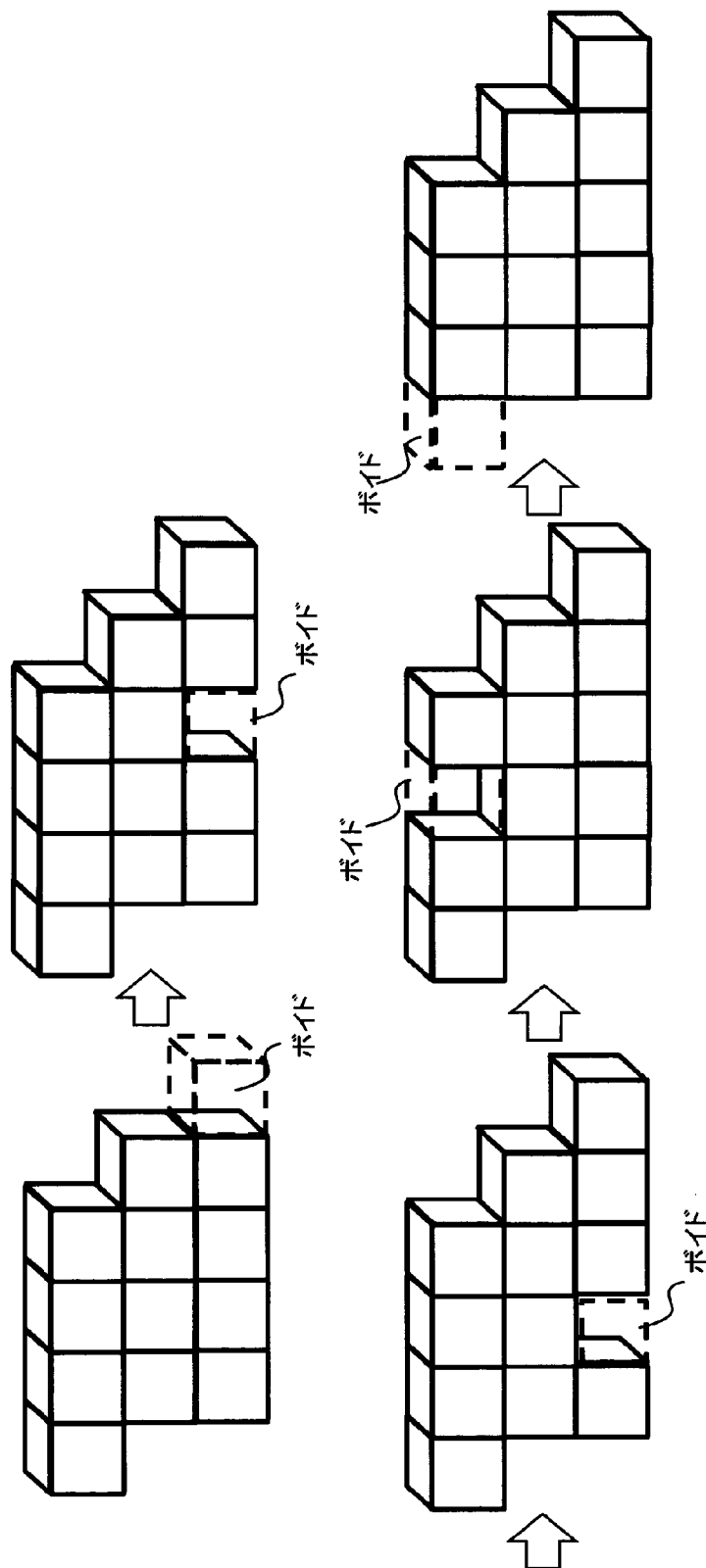
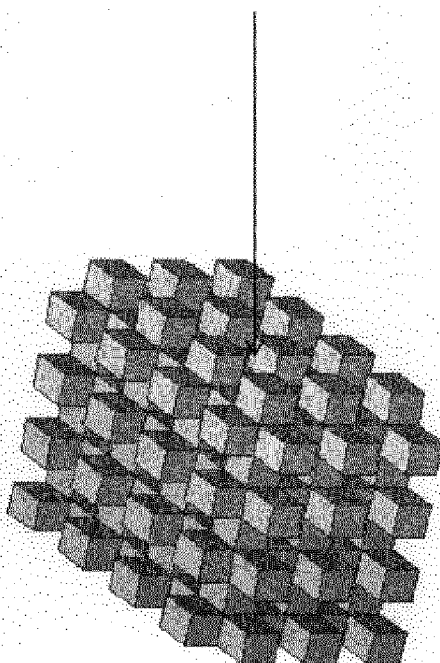
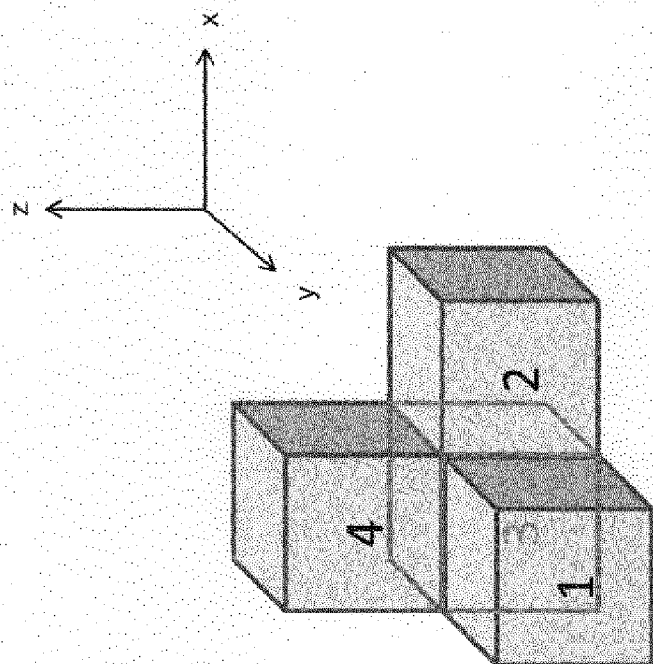


図3

[図4]



[図4]

[図5]

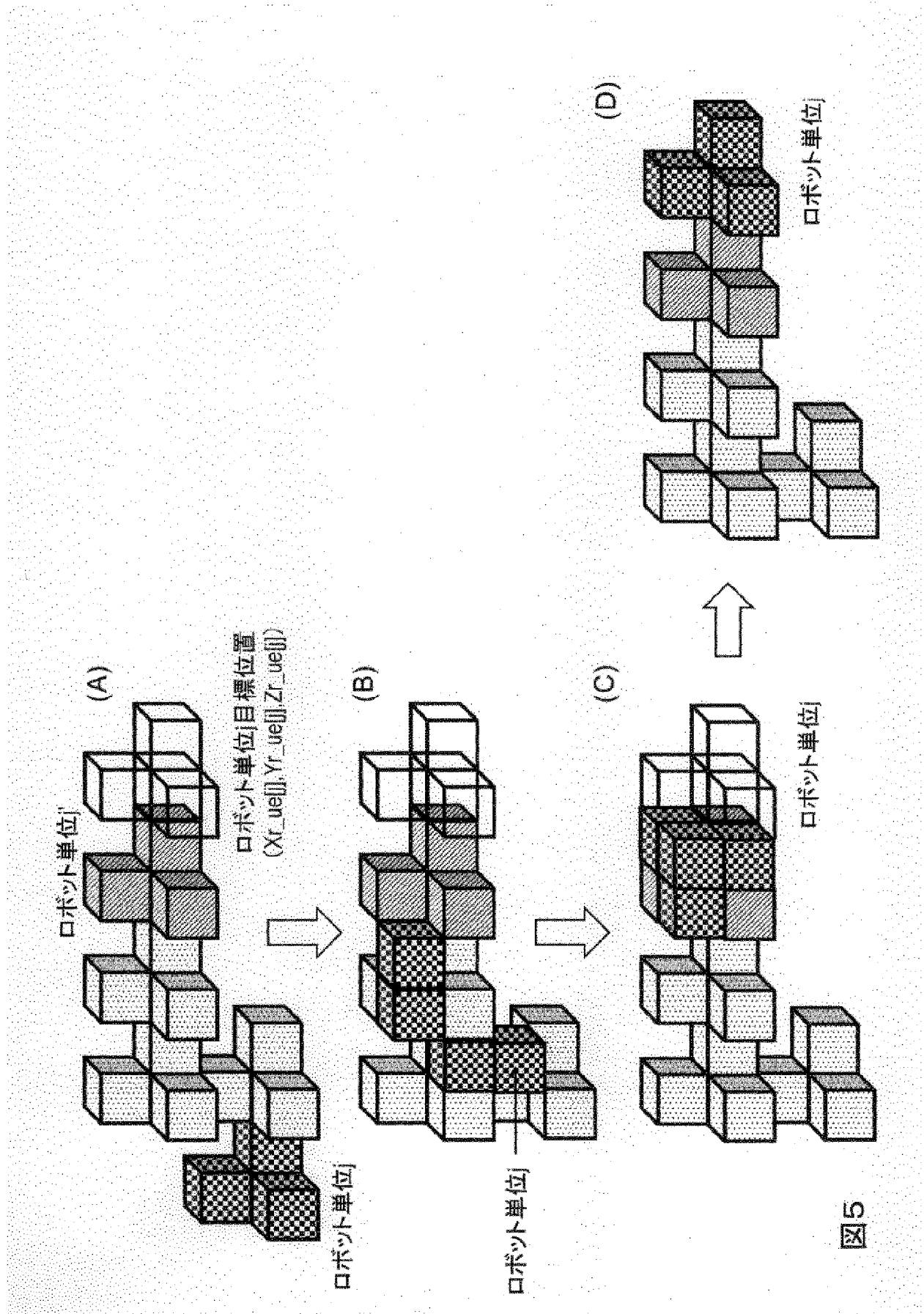


図5

[図6]

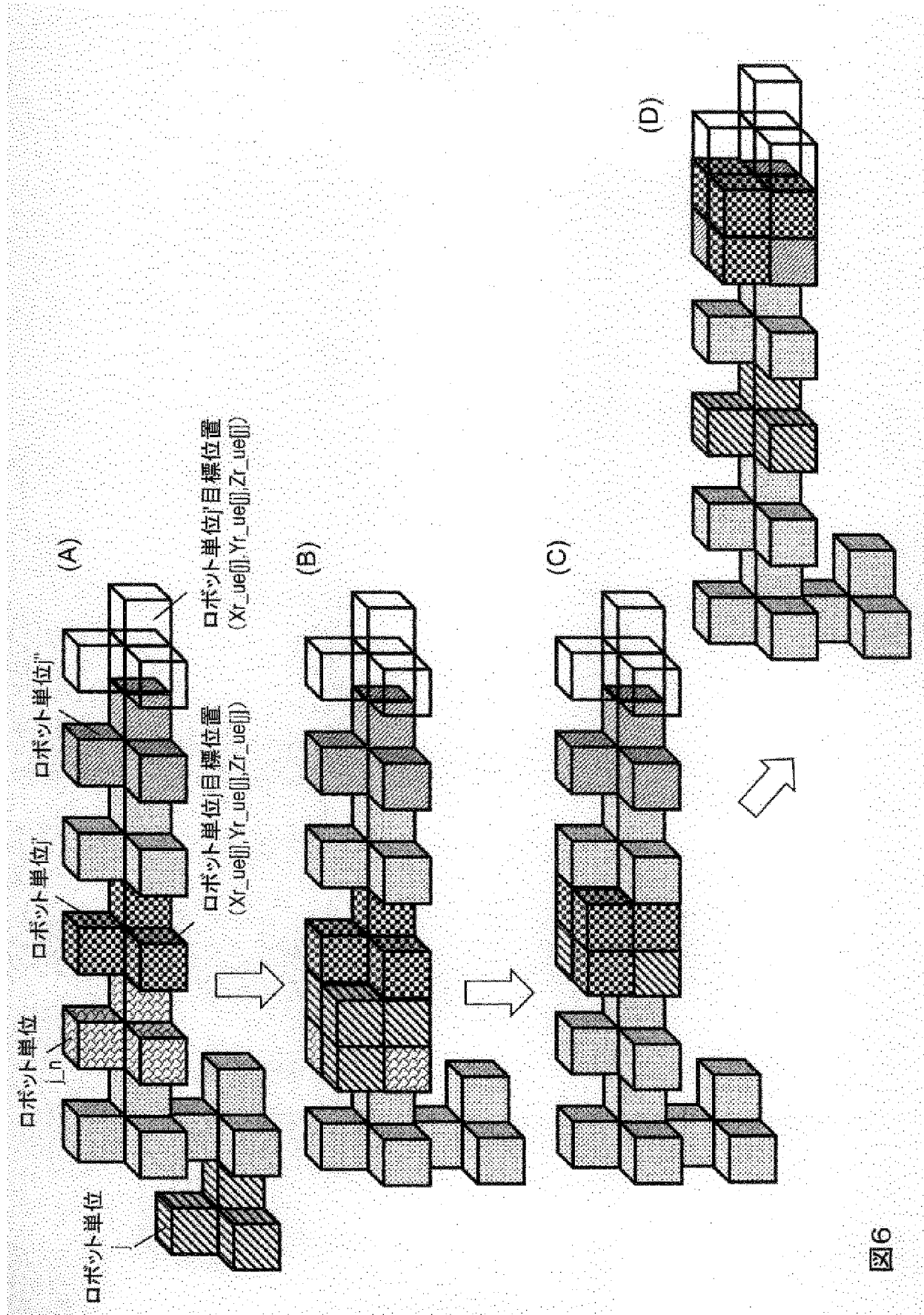


図6

[図7]

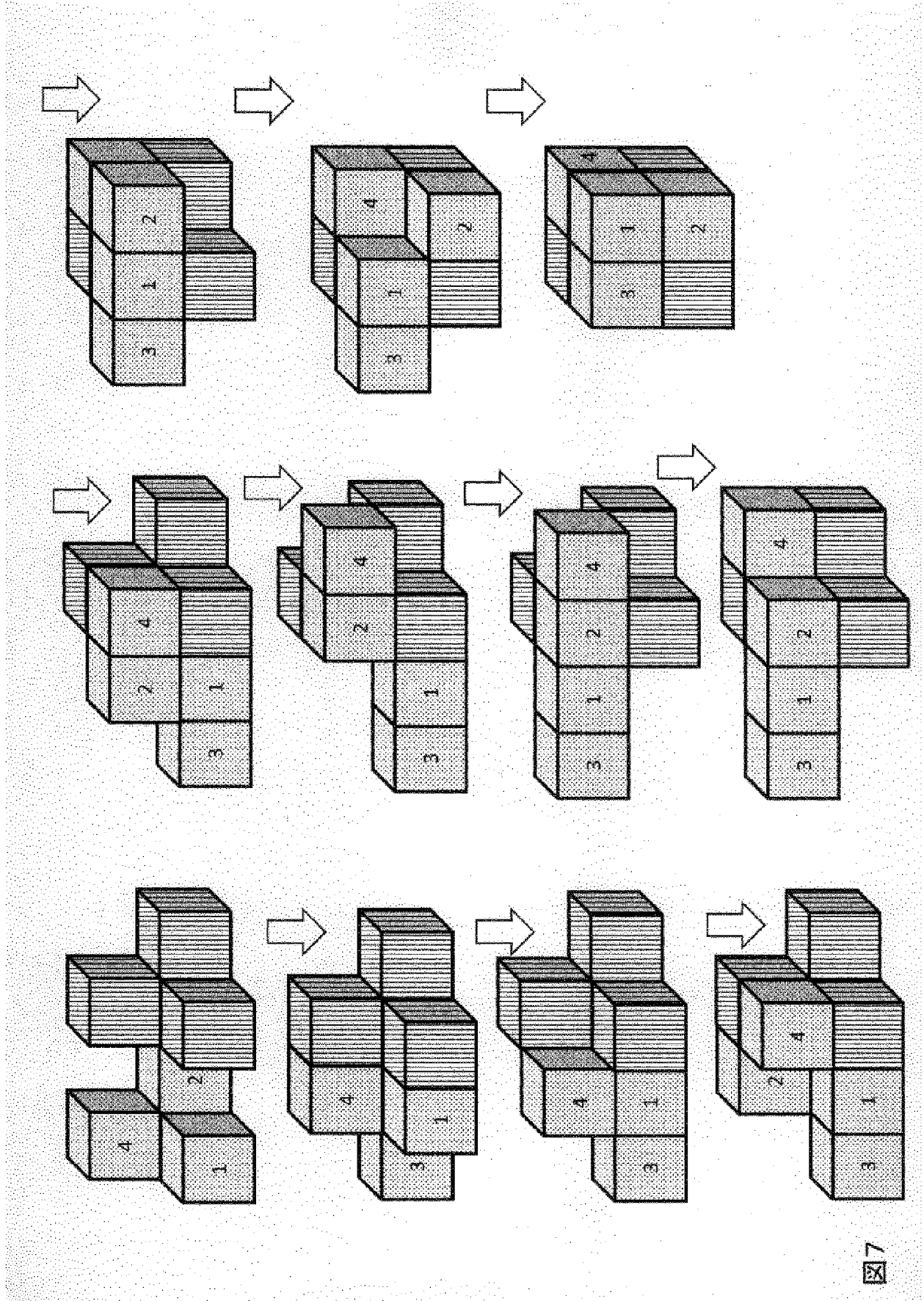
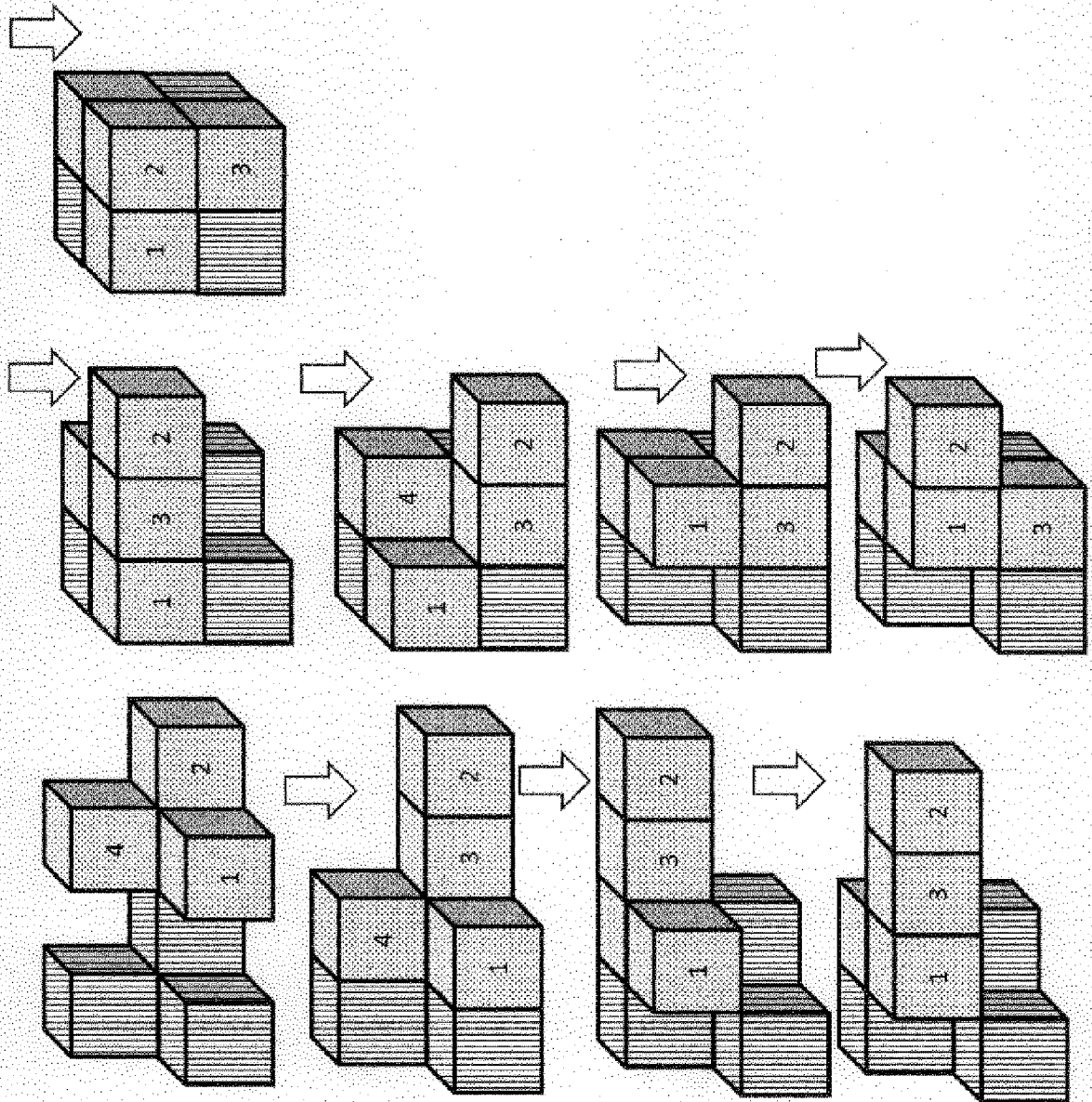
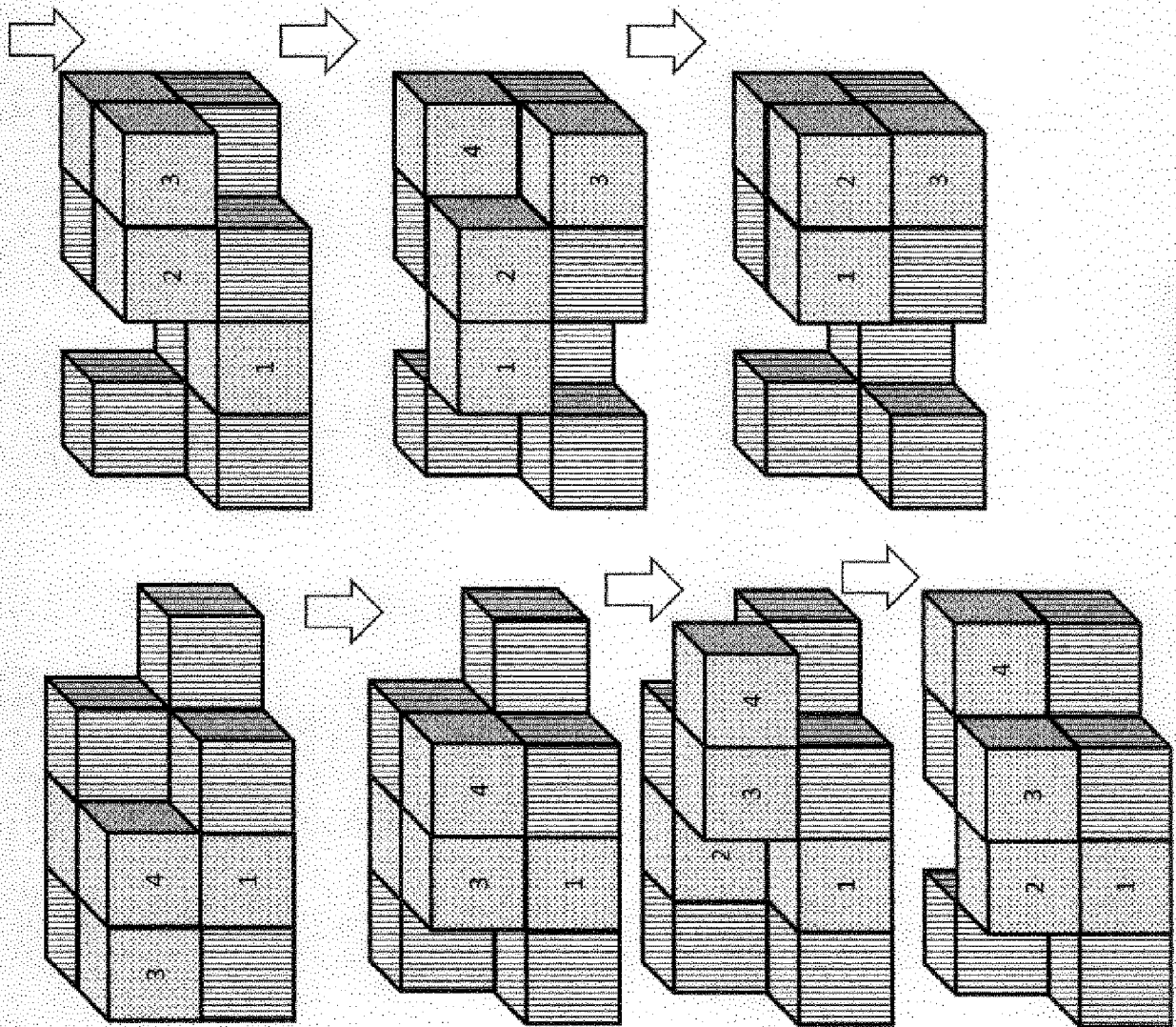


図7

[図8]



[図9]



[図10]

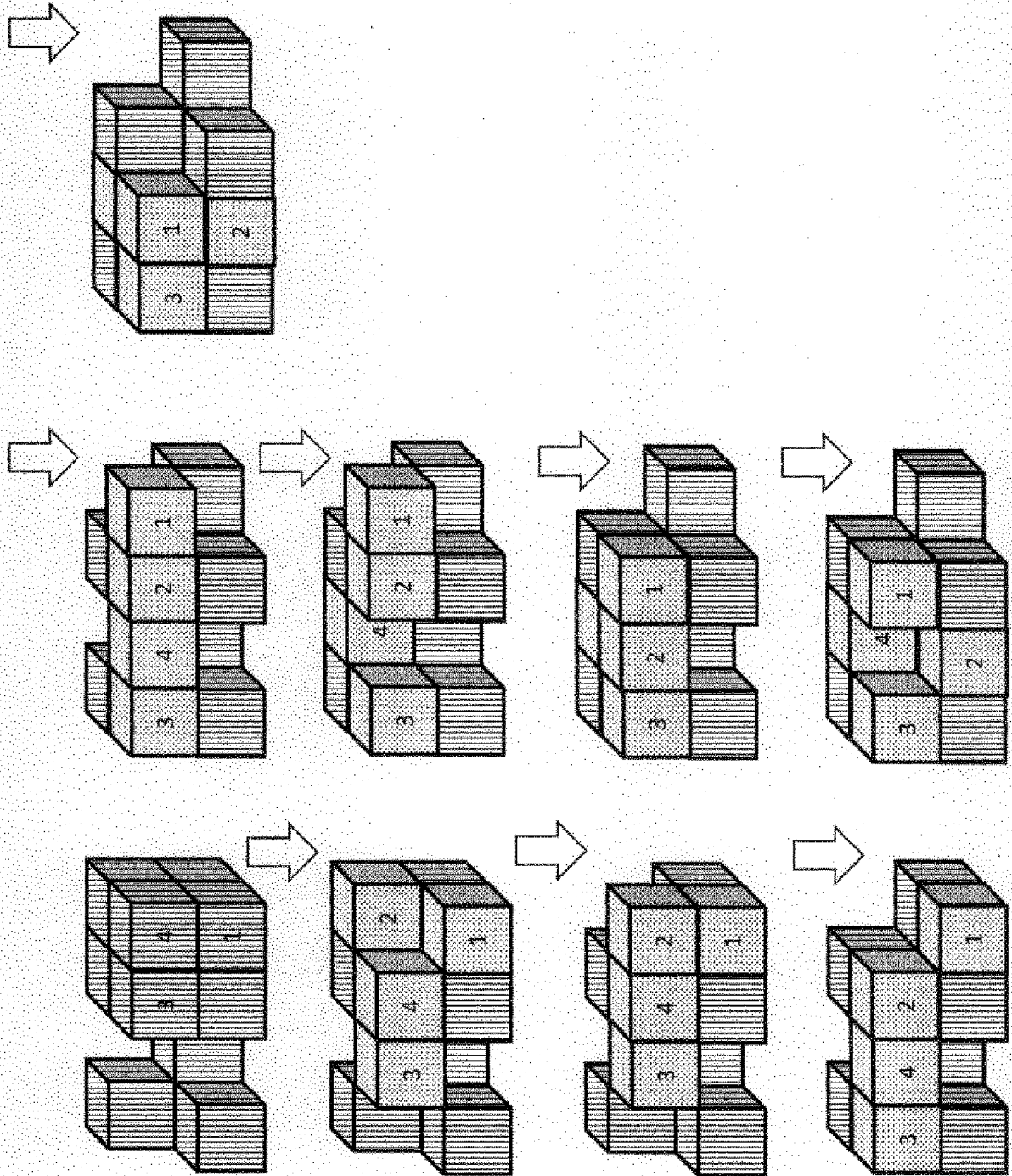
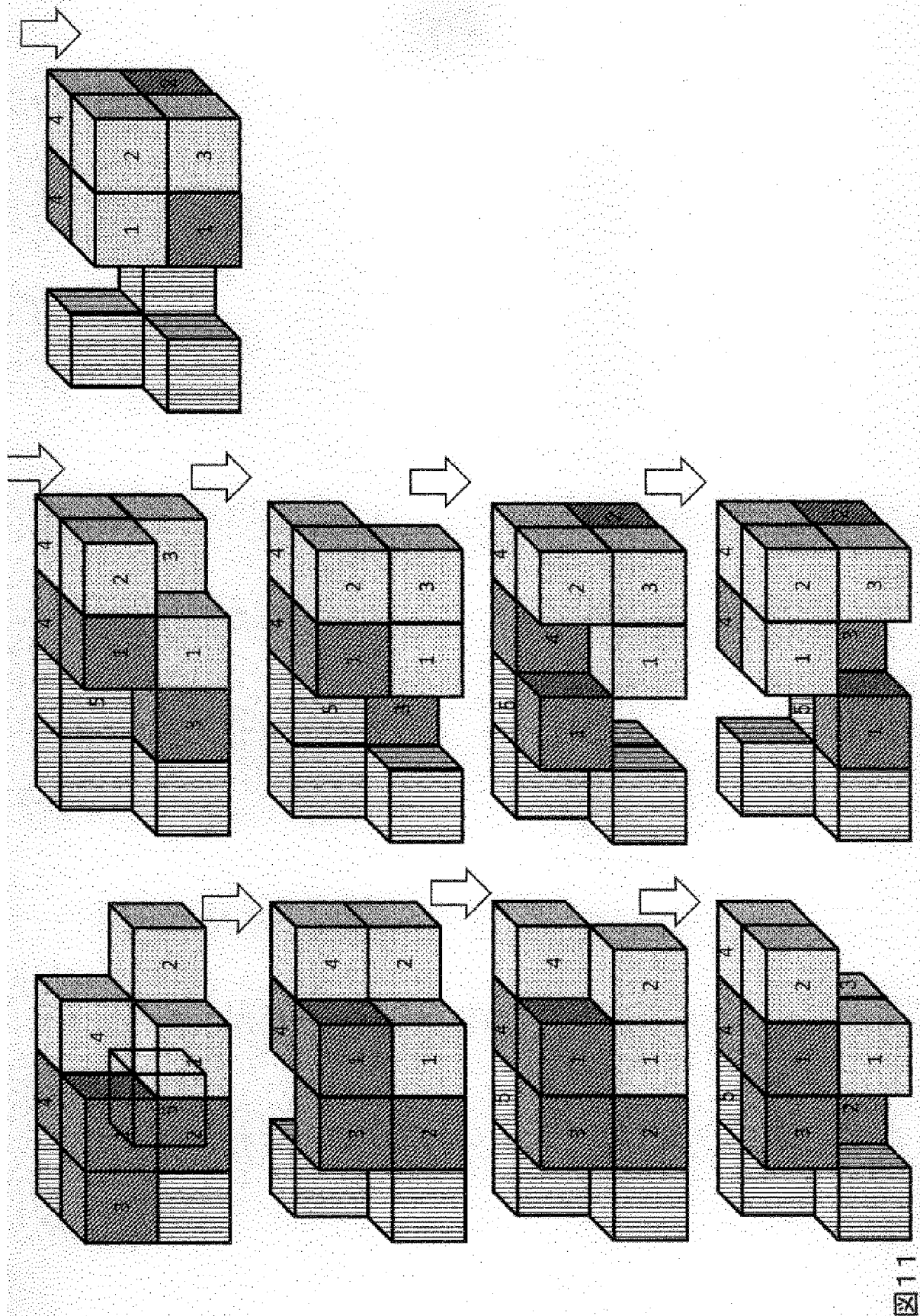


図10

[図11]



[図11]

[図12]

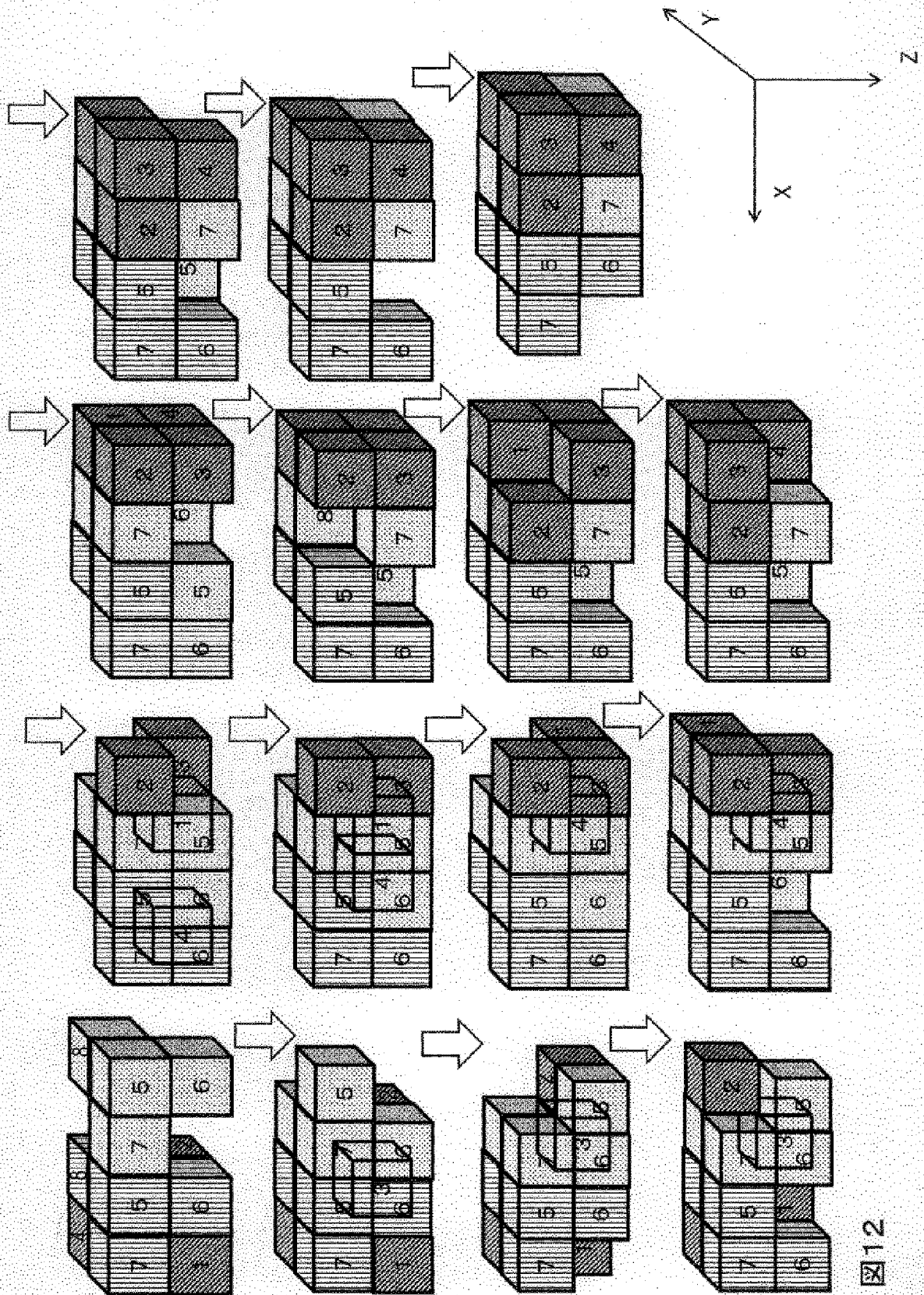
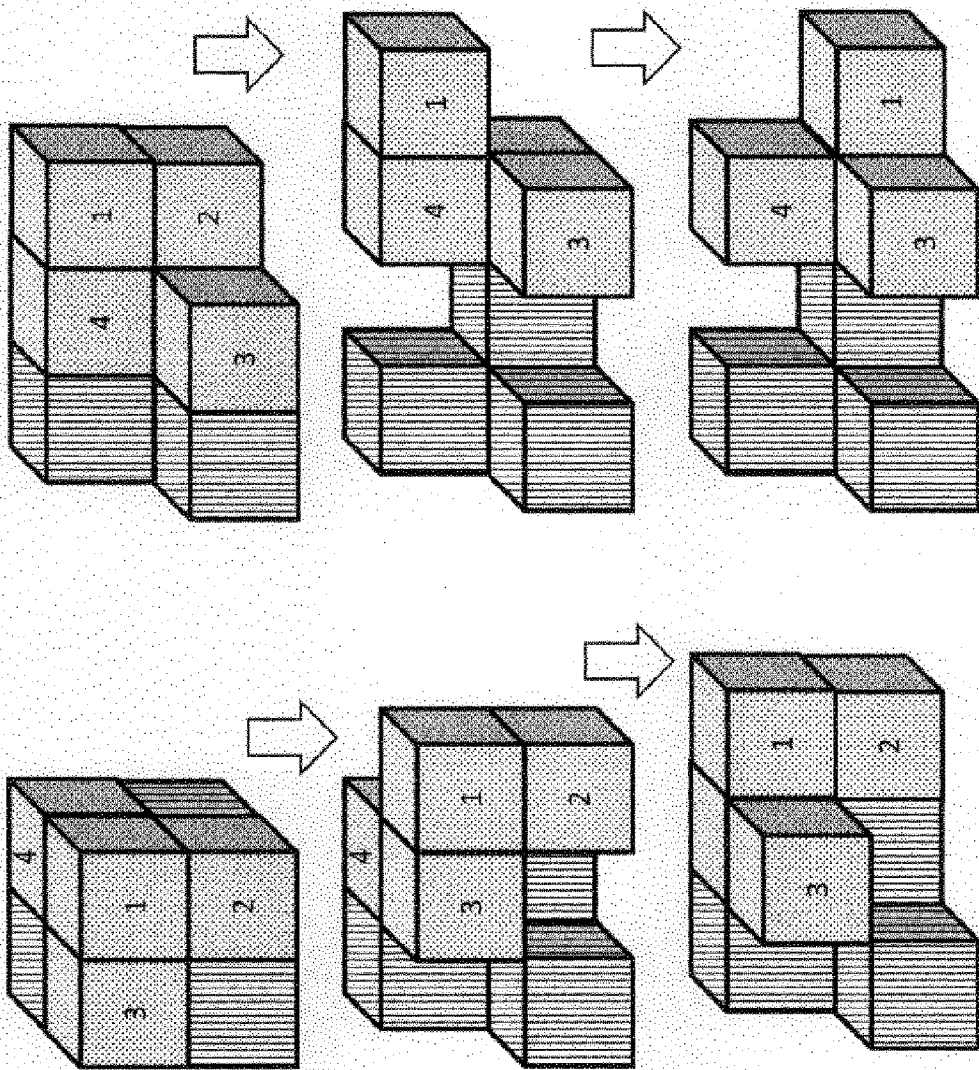
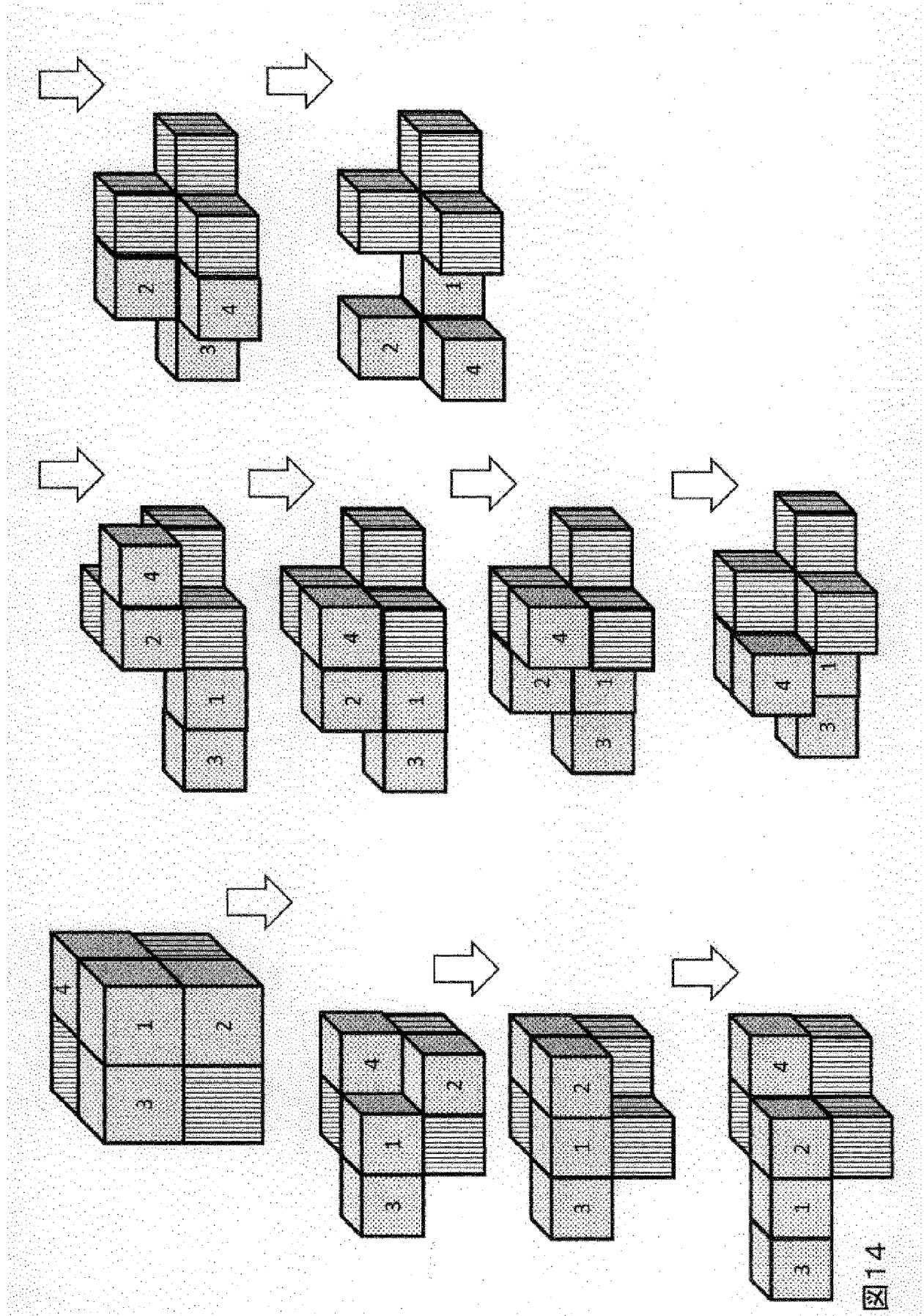


図12

[図13]



[図14]



[図15]

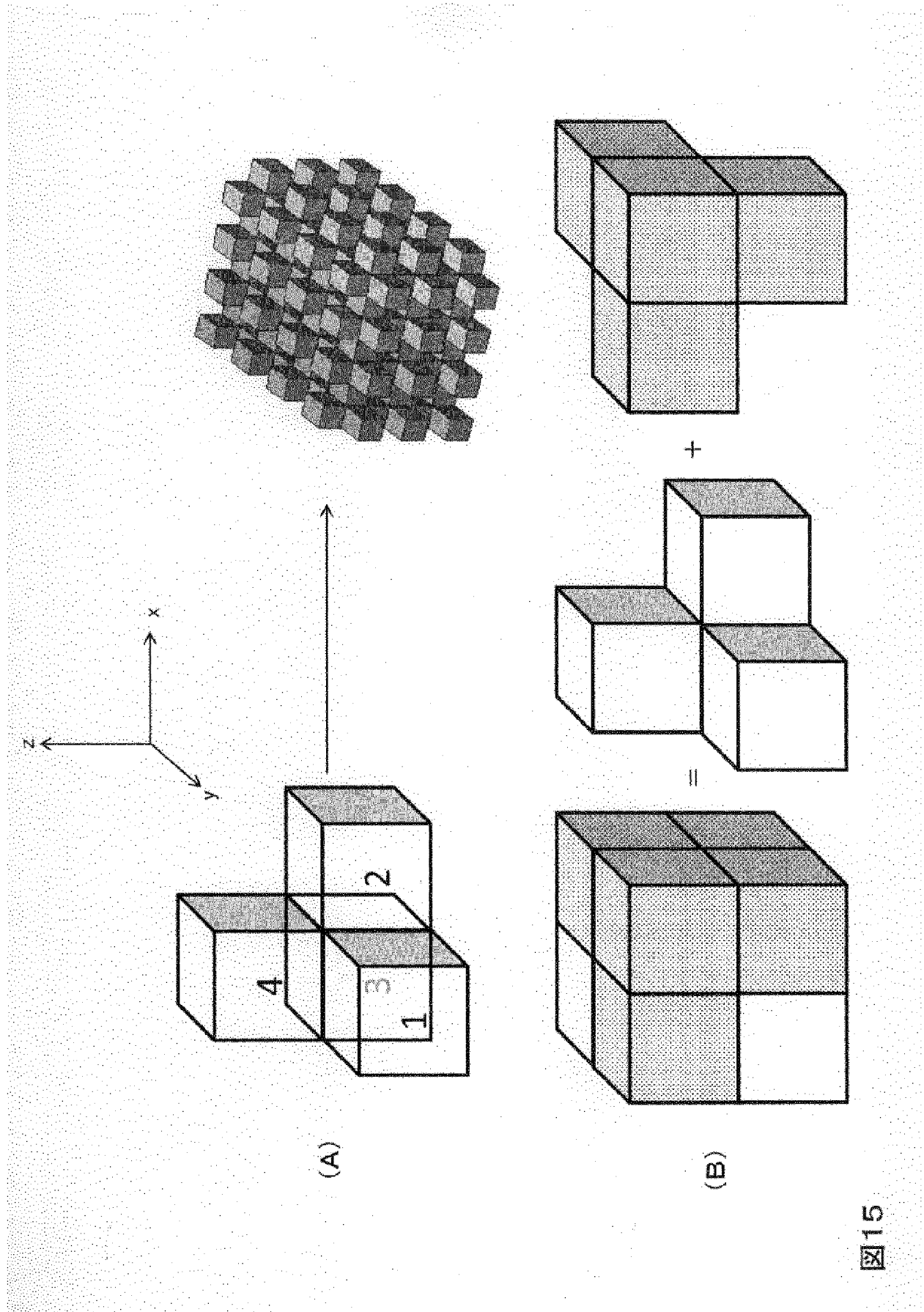


図15

[図16]

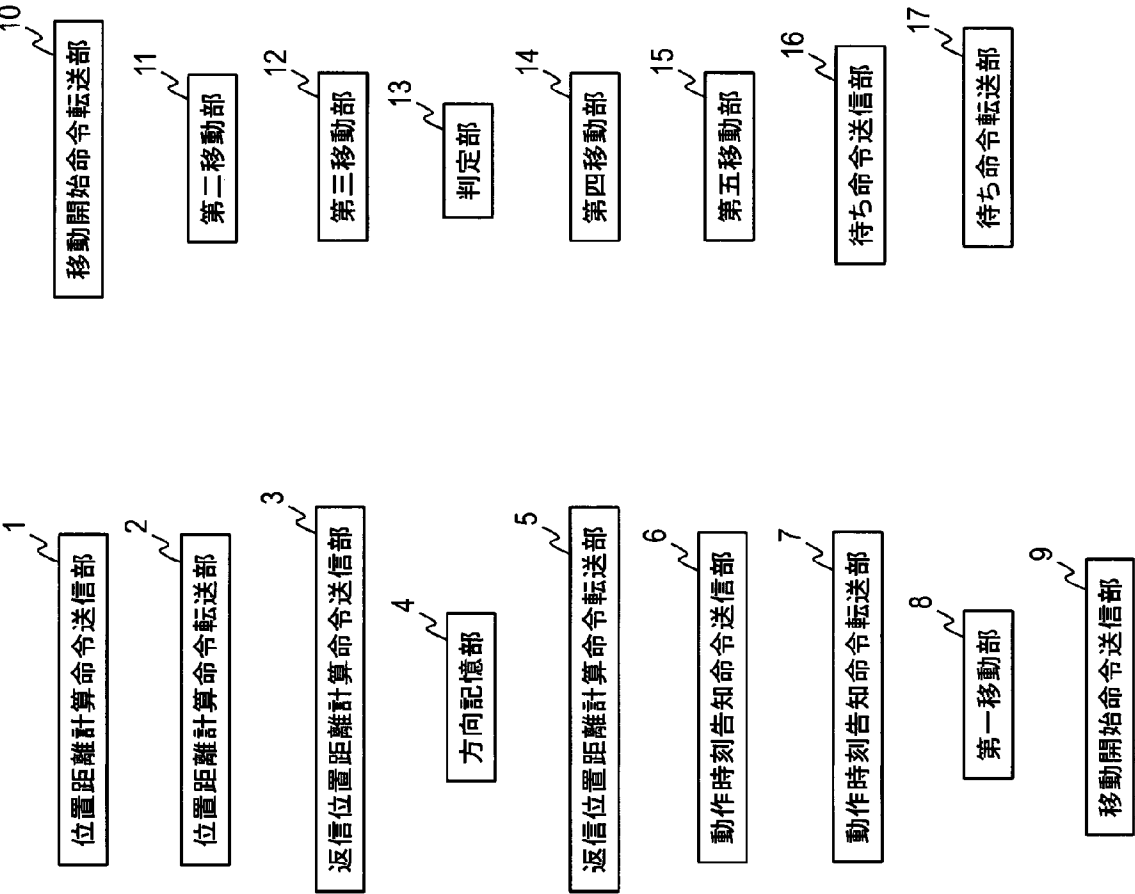


図16

[図17]

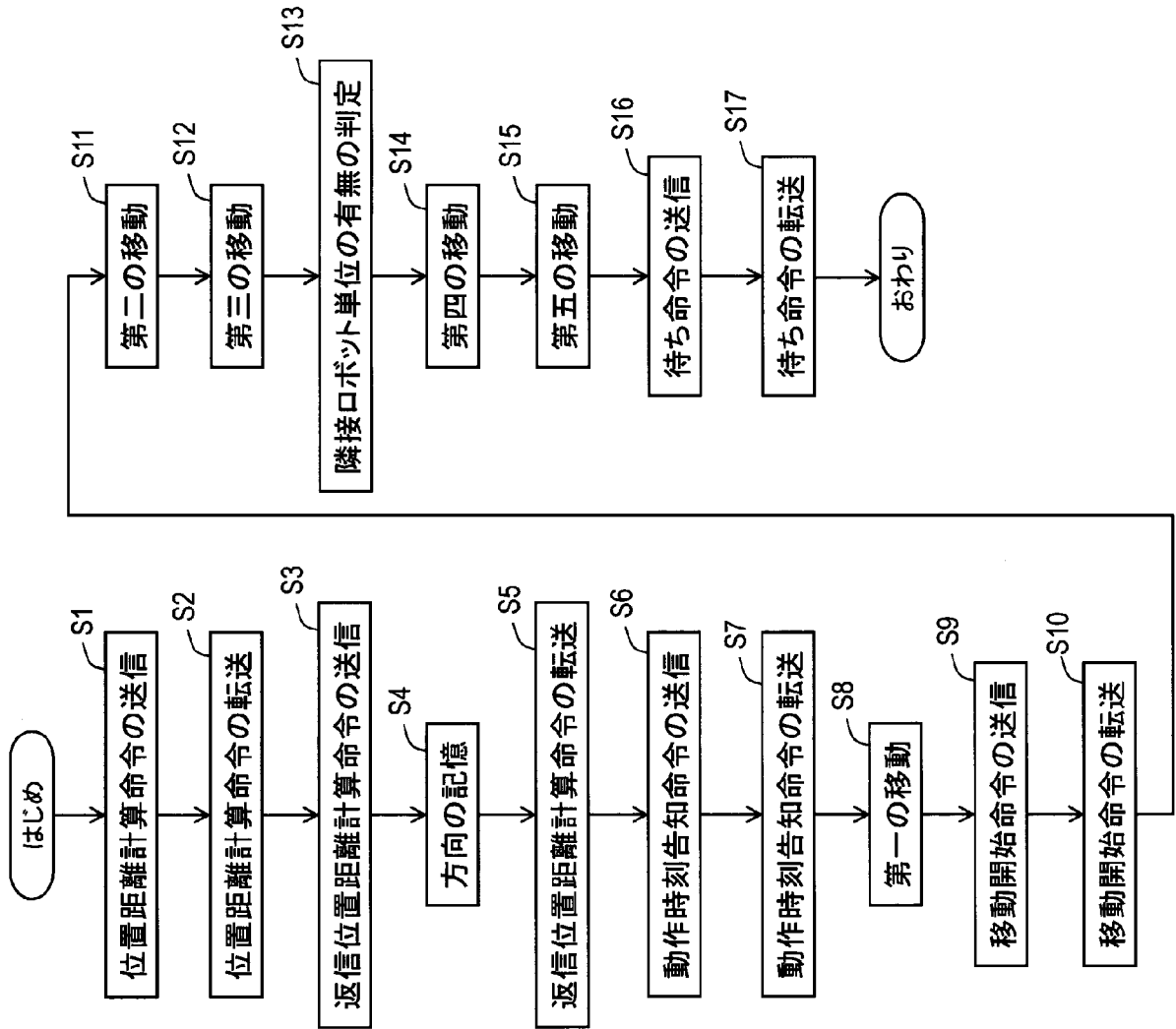


図17

[図18]

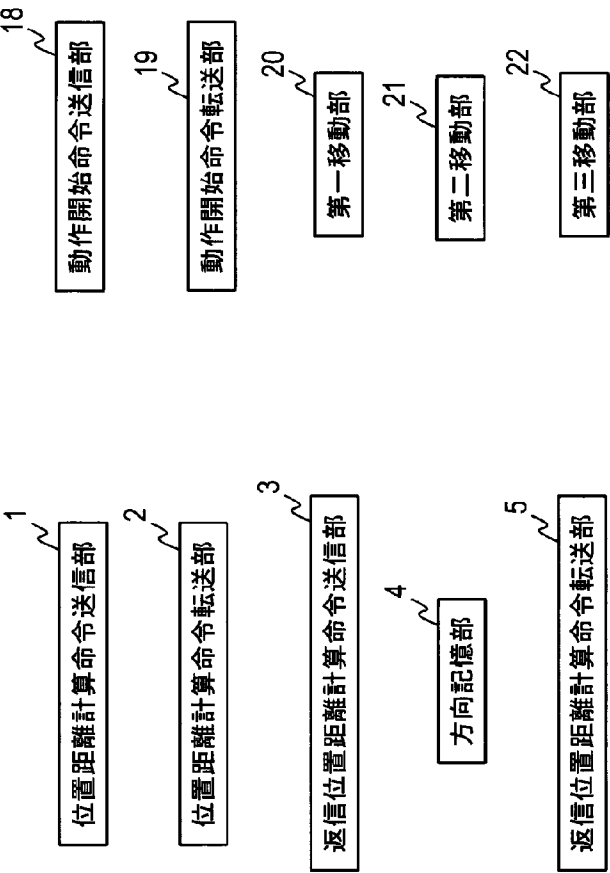


図 18

[図19]

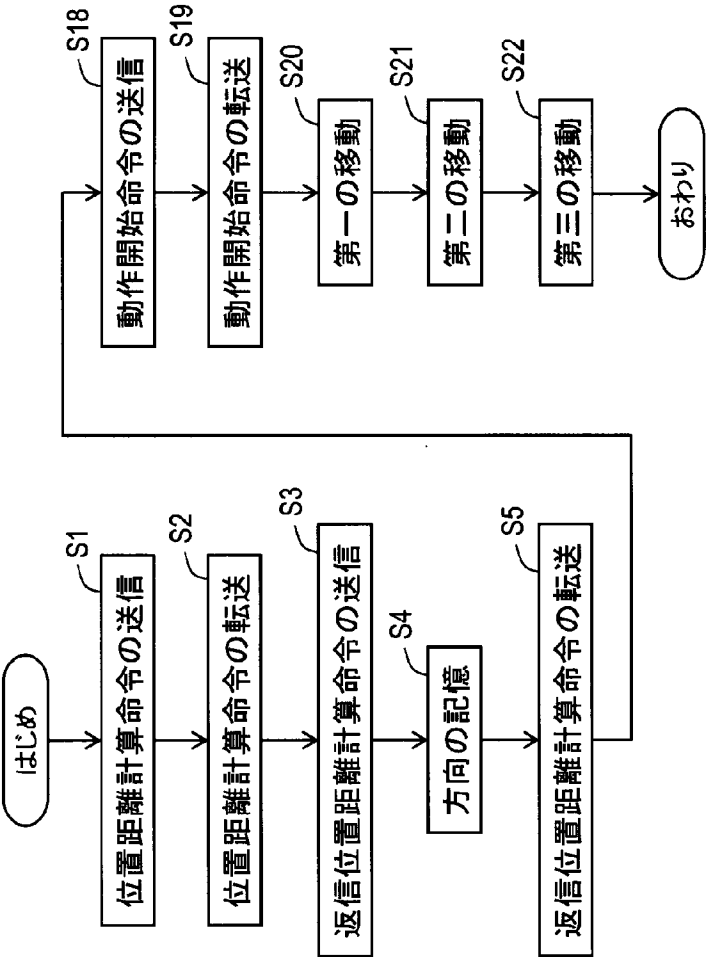


図19

[図20]



図20

[図21]

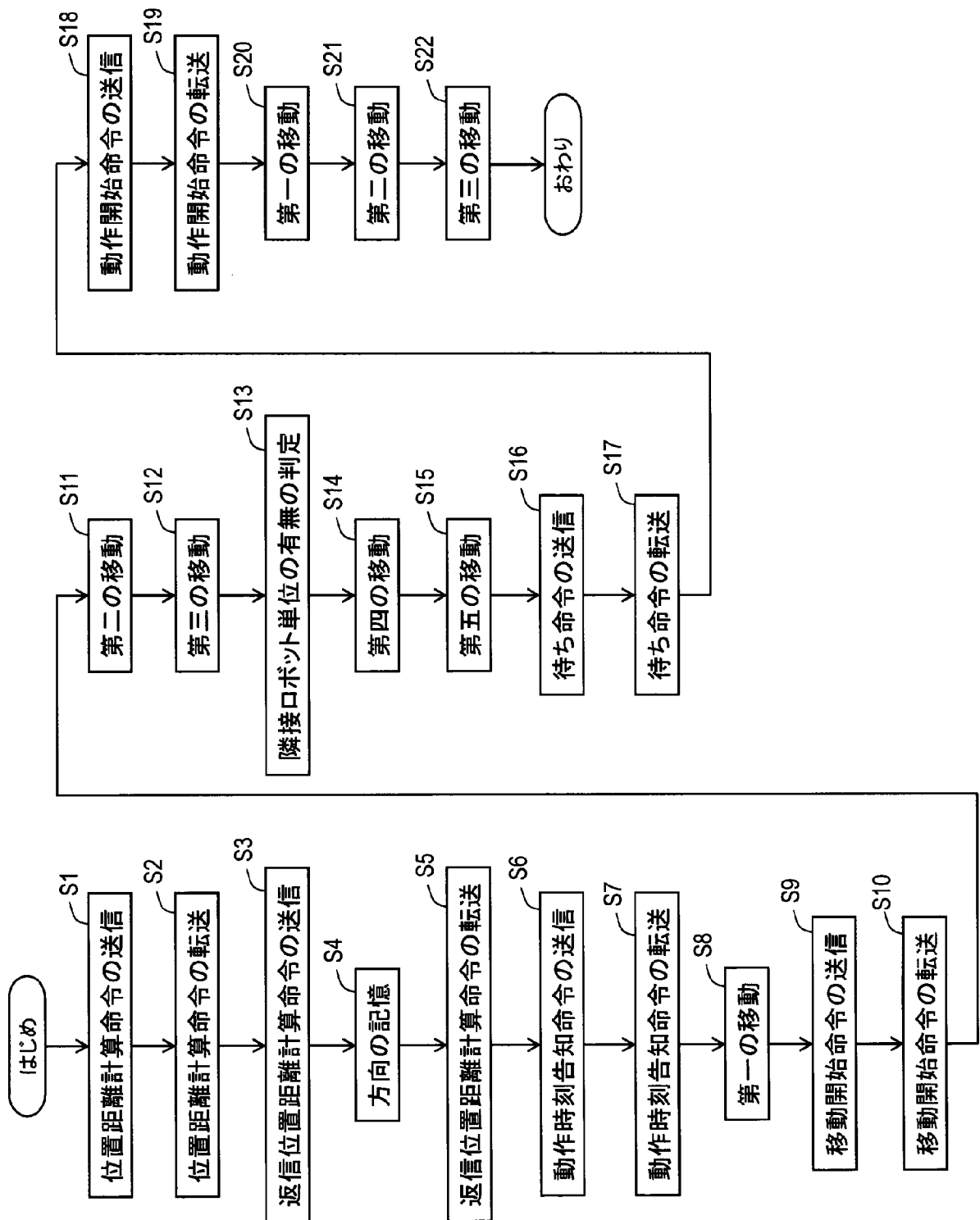


図21

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2019/031291

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl. G05D1/00 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl. G05D1/00

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan	1922-1996
Published unexamined utility model applications of Japan	1971-2019
Registered utility model specifications of Japan	1996-2019
Published registered utility model applications of Japan	1994-2019

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2003-48179 A (JAPAN SCIENCE AND TECHNOLOGY CORP.) 18 February 2003 (Family: none)	1-6
A	鈴木陽介, 力学環境に適応変形する群ロボット, 日本ロボット学会誌, 第28巻 第3号, 社団法人日本ロボット学会, 15 April 2010, pp. 53-61, (SUZUKI, Yosuke, "Reconfigurable Modular Robot Adaptively Transforming a Mechanical Structure", Journal of the Robotics Society of Japan, vol. 28, no. 3, The Robotics Society of Japan)	1-6

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"I" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
08 October 2019 (08.10.2019)

Date of mailing of the international search report
29 October 2019 (29.10.2019)

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. G05D1/00(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. G05D1/00

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2019年
日本国実用新案登録公報	1996-2019年
日本国登録実用新案公報	1994-2019年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2003-48179 A（科学技術振興事業団）2003.02.18, （ファミリーなし）	1-6
A	鈴木陽介，力学環境に適応変形する群ロボット， 日本ロボット学会誌，第28巻第3号，社団法人日本ロボット学会， 2010.04.15, p53-61	1-6

C欄の続きにも文献が列挙されている。

パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

08.10.2019

国際調査報告の発送日

29.10.2019

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（ISA/J P）

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

牧 初

3U

9064

電話番号 03-3581-1101 内線 3364