

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 23 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26540130

研究課題名(和文)複数ヒューマノイドロボットによる協調物体搬送

研究課題名(英文)Cooperative Object Transportation by Multiple Humanoid Robots

研究代表者

近野 敦 (Konno, Atsushi)

北海道大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：90250688

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：複数ロボット協調物体搬送ではリーダー・フォロワー型協調制御が盛んに研究されてきたが、リーダーが動作を始めてからフォロワーがその力に応じて動作計画を行うため、二足歩行ロボットではその動作の時間遅れにより転倒する危険性がある。そこで本研究では、全てのロボットが対等に動作する対称型協調制御を開発した。動力学シミュレーションで、リーダー・フォロワー型協調制御ではヒューマノイドロボットの何台かが転倒に至るような搬送速度でも、提案する対称型協調制御では全てのロボットが転倒することなく物体搬送が可能であることを示した。2台の実ヒューマノイドロボットを用いて物体搬送実験を行い、提案手法の有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：For cooperative object transportation by multiple mobile robots, the leader-follower type cooperation has been enthusiastically studied so far. However, in the leader-follower type cooperation, follower robots plan their biped gaits based on the forces generated at their hands after a leader robot moves. Therefore, in the cooperation among biped robots, the time-lag between leader and follower robots may cause fall down of biped robots. Therefore, symmetry type cooperation has been developed in this project, in which every robots synchronously move. Dynamic simulation results show that when the object transportation speed is fast, the leader-follower type cooperation becomes unstable (some of robots fall), while the symmetry-type cooperation maintains stability. The proposed symmetry type cooperation was also verified by performing experiments using two real humanoid robots.

研究分野：ロボット工学

キーワード：ヒューマノイドロボット 協調制御 機械力学・制御 知能ロボティクス

1. 研究開始当初の背景

ロボットには、人間にとって危険できつい仕事を代替することが期待されている。そのような仕事では、例えば重量物の搬送など複数台のロボットが協調して行わなければならない作業がある。そのため、主に車輪型ロボットによる複数台の協調作業が研究されてきた(引用文献①)。

しかし車輪型ロボットは段差のある路面や階段などを移動できないという問題があり、人間のために整備されたインフラを活用しやすいヒューマノイドロボットが近年盛んに研究開発されている(引用文献②)。例えば Yokoyama らは人間とヒューマノイドロボットの協調物体搬送を実現した(引用文献③)。しかし人間の作業を代替するという本来の目的を考えると、人間が介在しない協調物体搬送が望ましい。

本研究申請者らは世界に先駆けて、2台のヒューマノイドロボットによる協調物体搬送を実現した(引用文献④)。この協調物体搬送ではリーダー・フォロワー型を採用したが、この方式では安定性の面で限界があることがわかってきた。図1(a)にリーダー・フォロワー型の概念を示す。リーダーは動作を計画し、その後、動作を開始する。リーダーの動作により把持物体に内力が生じると、この内力をキャンセルするようにフォロワーが動作を計画し行動する。このようにフォロワーの動作はリーダーの動作から必ず遅れる。この遅れは車輪型ロボットの協調では大きな問題になっていなかったが、ヒューマノイドロボットでは、転倒を引き起こす主たる要因となる。

これに対し対称型(図1(b))ではリーダーとフォロワーの区別をつけず、全てのロボットが同時に行動するため、転倒の危険性を大幅に減少させることができる。車輪型ロボットにおいては、動作同期のための通信を必要としないリーダー・フォロワー型が主流となったが、ヒューマノイドロボットにおいては転倒の危険性を減らすことを何よりも優先しなければならない。

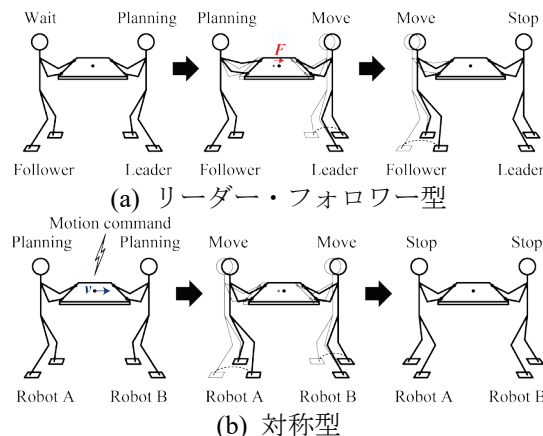


図1 複数ロボット協調搬送の二つのアプローチ

2. 研究の目的

以上の背景から、本研究では全てのヒューマノイドロボットを対等に扱う対称型の協調搬送制御(図1(b))と、搬送のために必要な実時間歩容生成を開発することを目的とする。

歩行型ロボットによる協調制御では、歩行という不連続な接地条件変化が発生すること、歩行時の上半身の揺動による手先位置偏差を腕で補正しなければならないことなどから、物体内に発生する内力の制御、搬送のための外力制御に伴う力分配などが車輪型ロボットに比べて飛躍的に困難になる。また協調物体搬送時には、通常の歩行と異なり、搬送物体を中心とした回転運動を伴う、複数台ロボットのオンライン歩容軌道計画が必要となる。

開発する対象型協調搬送制御と実時間歩容生成を動力学シミュレータ OpenHRP3 で検証した後、ヒューマノイドロボット HRP-2 に実装し、2台の HRP-2 によるこの協調制御実験でその有効性を確かめる。重量物搬送など、人間にとってきつい作業をロボットに代替させる基礎技術を確立することが、本研究の目的である。

3. 研究の方法

本研究では、複数ヒューマノイドロボットの協調制御則とオンライン歩容生成を、まず動力学シミュレータ OpenHRP3 で検証しながら進め、十分な検証がすんだ後、現有する2台のヒューマノイドロボット HRP-2 で検証実験を行う。具体的には、以下の(1)~(6)の六つの課題に分け、研究を実施した。

- (1) 移動機構を抽象化した複数ヒューマノイドロボットの対称型協調制御則の構築
- (2) オンライン歩容生成技術の確立
- (3) 脚移動を伴う複数ヒューマノイドロボットの対称型協調制御則の構築
- (4) 動力学シミュレータ OpenHRP3 での検証
- (5) 遠隔操作コックピットの開発
- (6) 2台のヒューマノイドロボットによる検証実験

4. 研究成果

- (1) 移動機構を抽象化した複数ヒューマノイドロボットの対称型協調制御則の構築

図2に示すように、 $n$ 本のロボットアームが一つの変形しない物体を把持している場合を考える。ロボットアーム  $i$  が物体を把持している点の世界座標系  $\Sigma_w$  での位置・姿勢を  $\mathbf{x}_i = [\mathbf{p}_i^T \ \boldsymbol{\phi}_i^T]^T$  で、速度を  $\mathbf{v}_i = [\dot{\mathbf{p}}_i^T \ \boldsymbol{\omega}_i^T]^T$  で表す。 $\mathbf{p}_i$  は3次元位置ベクトル、 $\boldsymbol{\phi}_i$  はオイラー角など姿勢を表す3変数からなる疑似ベクトル、 $\boldsymbol{\omega}_i$  は角速度ベクトルである。同様に物体座標系  $\Sigma_a$  の原点  $O_a$  の世界座標系  $\Sigma_w$  での位置・姿勢を  $\mathbf{x}_E = [\mathbf{p}_E^T \ \boldsymbol{\phi}_E^T]^T$  で、速度を  $\mathbf{v}_E = [\dot{\mathbf{p}}_E^T \ \boldsymbol{\omega}_E^T]^T$  で表す。把持点  $\mathbf{p}_i$  から  $O_a$  に向かうベクトルを  $\mathbf{r}_i$  とし、 $\mathbf{r}_i$  先端の位置・姿勢を  $\mathbf{x}_{ai} = [(\mathbf{p}_i + \mathbf{r}_i)^T \ \boldsymbol{\phi}_{ai}^T]^T$ 、また  $\mathbf{x}_{ai}$  での速度を

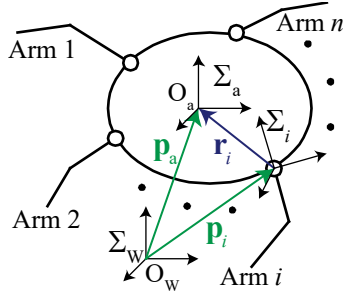


図2 複数ロボットアームによる物体把持

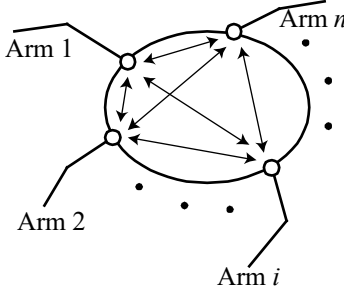


図3 2本のロボットアーム間に働く内力

$\mathbf{v}_{ai} = [(\dot{\mathbf{p}}_i + \dot{\mathbf{r}}_i)^T \quad \boldsymbol{\omega}_{ai}^T]^T$  とする. 物体の変形を考慮せず, ロボットアームが把持位置で6次元幾何拘束を受けるとすると常に  $\mathbf{x}_{ai} = \mathbf{x}_E$ ,  $\mathbf{v}_{ai} = \mathbf{v}_E$  である.  $\mathbf{x}_{ai}$  および  $\mathbf{v}_{ai}$  をまとめたベクトルを

$$\mathbf{x}_a = [\mathbf{x}_{a1}^T \quad \dots \quad \mathbf{x}_{an}^T]^T, \quad \mathbf{v}_a = [\mathbf{v}_{a1}^T \quad \dots \quad \mathbf{v}_{an}^T]^T \quad (1)$$

とする.  $\mathbf{x}_a$  の時間微分と  $\mathbf{v}_a$  の関係は

$$\mathbf{v}_a = \mathbf{B}_a \dot{\mathbf{x}}_a \quad (2)$$

と表せる.  $\mathbf{B}_a$  は各アームの姿勢角の微分  $\dot{\mathbf{q}}_{ai}$  を角速度  $\boldsymbol{\omega}_{ai}$  に変換する  $6n \times 6n$  行列である. アーム  $i$  に含まれるジョイントの角度ベクトルを  $\mathbf{q}_i$  とし,  $\mathbf{v}_{ai}$  と  $\mathbf{q}_i$  の関係を  $\mathbf{v}_{ai} = \mathbf{J}_i \dot{\mathbf{q}}_i$  で表すと

$$\mathbf{v}_a = \mathbf{J} \dot{\mathbf{q}}, \quad \dot{\mathbf{q}} = [\mathbf{q}_1^T \quad \dots \quad \mathbf{q}_n^T]^T, \quad (3)$$

$$\mathbf{J} = \text{blockdiag}[\mathbf{J}_1 \quad \dots \quad \mathbf{J}_n]$$

となる.

ロボットアーム  $i$  が把持点に作用する力を  $\mathbf{f}_i$ , モーメントを  $\mathbf{m}_i$  とし, それらをまとめて  $\mathbf{h}_i = [\mathbf{f}_i^T \quad \mathbf{m}_i^T]^T$  と表す. 物体座標系の原点  $O_a$  に力・モーメント  $\mathbf{h}_{ai}$  を作用させるためには, 把持点に与える力とモーメント  $\mathbf{h}_i$  を

$$\mathbf{h}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_3 \\ [\mathbf{r}_i \times] & \mathbf{I}_3 \end{bmatrix} \mathbf{h}_{ai} \quad (4)$$

とする.  $\mathbf{I}_j$ ,  $\mathbf{0}_j$  はそれぞれ  $j \times j$  の単位行列とゼロ行列,  $[\mathbf{r}_i \times]$  は任意のベクトル  $\mathbf{k}$  に対し  $[\mathbf{r}_i \times] \mathbf{k} = \mathbf{r}_i \times \mathbf{k}$  を満たす  $3 \times 3$  歪対称行列である. 物体を把持する  $n$  本のロボットアームが物体の原点  $O_a$  にそれぞれ6次元の力・モーメントを作用するとき, 物体を動かす外力  $\mathbf{h}_E \in R^6$  は以下で与えられる.

$$\mathbf{h}_E = \sum_{i=1}^n \mathbf{h}_{ai} = \mathbf{W} \mathbf{h}_a \quad (5)$$

$\mathbf{W} = [\mathbf{I}_6 \quad \dots \quad \mathbf{I}_6] \in R^{6 \times 6n}$ ,  $\mathbf{h}_a = [\mathbf{h}_{a1}^T \quad \dots \quad \mathbf{h}_{an}^T]^T \in R^{6n}$  物体を動かす望ましい外力  $\mathbf{h}_E$  が与えられたとき, それを実現する  $\mathbf{h}_a$  は以下で与えられる.

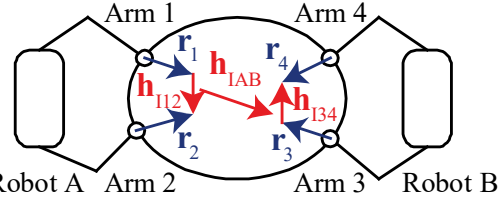


図4 2台のヒューマノイドロボットによる協調制御

$$\mathbf{h}_a = \mathbf{W}^{-1} \mathbf{h}_E + \mathbf{V} \mathbf{h}_I = \mathbf{U} \mathbf{h}_{EI} \quad (6)$$

$$\mathbf{U} \triangleq [\mathbf{W}^{-1} \quad \mathbf{V}] \in R^{6n \times 6n}, \quad \mathbf{h}_{EI} \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{h}_E \\ \mathbf{h}_I \end{bmatrix} \in R^{6n}$$

ここで  $\mathbf{W}^{-1} \in R^{6n \times 6n}$  は  $\mathbf{W}$  の一般化逆行列,  $\mathbf{V} \in R^{6n \times 6(n-1)}$  は  $\mathbf{W} \mathbf{V} = \mathbf{0}_{6 \times 6(n-1)}$  を満たす行列,  $\mathbf{h}_I \in R^{6(n-1)}$  は任意のベクトルである.

$n$  本のロボットアームがそれぞれ6次元の力・モーメントを把持物体原点  $O_a$  に作用すると, 合計で  $6n$  次元の力・モーメントを作用することになる. このうち6次元が物体を動かす外力  $\mathbf{h}_E$  として作用し, 残りの  $6(n-1)$  次元が外力に影響を及ぼさない力  $\mathbf{h}_I$  すなわち内力として作用する. 図3に示すように  $n$  本のロボットアームで共通物体を把持したとき, 任意の2本のロボットアーム間に内力を定義すると, その数は  ${}_n C_2 = n(n-1)/2$  となる. しかし前述のように  $n$  本のロボットアームで制御可能なのは  $n-1$  個の内力 ( $6(n-1)$ 次元) であり,  $n > 2$  に対して  ${}_n C_2 > n-1$  となる. 残りの  ${}_n C_2 - 6(n-1)$  次元の内力は従属的に決まる. 考えられる  ${}_n C_2$  次元の内力から, どのようにして制御すべき  $6(n-1)$  次元の内力を決定するかは, これまでの研究で議論されてこなかった. そこで本研究では  $6(n-1)$  次元の内力選定の指針を提案した.

提案手法では, アーム  $i$  と  $j$  間の内力を

$$\mathbf{h}_{ij} = \frac{1}{2} (\mathbf{h}_{aj} - \mathbf{h}_{ai}) \quad (7)$$

で定義し, 制御すべき  $6(n-1)$  次元の内力を(7)式の線形和で与える. 図4に2台のヒューマノイドロボットが, それぞれ2本のアームで物体を把持している様子を示す. この場合  $n = 4$  であるから,  ${}_n C_2 = 6$  個の内力すなわち  $\mathbf{h}_{12}$ ,  $\mathbf{h}_{13}$ ,  $\mathbf{h}_{14}$ ,  $\mathbf{h}_{23}$ ,  $\mathbf{h}_{24}$ ,  $\mathbf{h}_{34}$  を定義することができる. 制御可能な内力の個数は  $n-1 = 3$  である. よって上記6個の内力の線形和で制御すべき内力3個を定義する. 2台のヒューマノイドロボットの協調制御では, 各ロボットの両手間内力  $\mathbf{h}_{12}$ ,  $\mathbf{h}_{34}$  および2台のロボット間内力  $\mathbf{h}_{IAB}$  (図4) が重要になる.  $\mathbf{h}_{IAB}$  は次のように定義できる.

$$\mathbf{h}_{IAB} = \frac{1}{2} \{ (\mathbf{h}_{a3} + \mathbf{h}_{a4}) - (\mathbf{h}_{a1} + \mathbf{h}_{a2}) \} \quad (8)$$

このように制御すべき内力を選ぶと内力ベクトル  $\mathbf{h}_I$  は以下のようなになる.

$$\mathbf{h}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_{112} \\ \mathbf{h}_{134} \\ \mathbf{h}_{1AB} \end{bmatrix} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} \mathbf{h}_{a1} \\ \mathbf{h}_{a2} \\ \mathbf{h}_{a3} \\ \mathbf{h}_{a4} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -\mathbf{I}_6 & \mathbf{I}_6 & \mathbf{0}_6 & \mathbf{0}_6 \\ \mathbf{0}_6 & \mathbf{0}_6 & -\mathbf{I}_6 & \mathbf{I}_6 \\ -\mathbf{I}_6 & -\mathbf{I}_6 & \mathbf{I}_6 & \mathbf{I}_6 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(5)と(9)をまとめると

$$\begin{bmatrix} \mathbf{h}_E \\ \mathbf{h}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{W} \\ \mathbf{C} \end{bmatrix} \mathbf{h}_a \quad (10)$$

となる. 式(6)との関係から

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \mathbf{W} \\ \mathbf{C} \end{bmatrix}^{-1} \quad (11)$$

である. ロボットアームが把持位置で幾何拘束を受けないと仮定し  $\mathbf{r}_i$  先端の仮想変位を考えると  $\mathbf{x}_{ai} \neq \mathbf{x}_E$ ,  $\mathbf{v}_{ai} \neq \mathbf{v}_E$  となる. このとき  $\mathbf{x}_{ai}$  と  $\mathbf{x}_E$  の偏差を

$$\delta \mathbf{x}_a = \left[ (\mathbf{x}_{a1} - \mathbf{x}_E)^T \cdots (\mathbf{x}_{an} - \mathbf{x}_E)^T \right]^T \quad (12)$$

で表す. 外力と内力  $\mathbf{h}_{EI}$  を加えることによって各アームの  $\mathbf{r}_i$  先端に  $\mathbf{h}_E$ ,  $\mathbf{h}_I$  方向に沿って生じる仮想相対変位を  $\mathbf{v}_{EI} \delta t$  とし, 以下のように定義する.

$$\mathbf{v}_{EI} \delta t \triangleq \left[ \mathbf{v}_E^T \quad \mathbf{v}_{I1}^T \quad \cdots \quad \mathbf{v}_{I(n-1)}^T \right]^T \delta t \quad (13)$$

また, アームが  $\mathbf{h}_a$  を加えることに  $\mathbf{r}_i$  先端によって生じる仮想変位を  $\mathbf{v}_a \delta t$  とする. 仮想仕事の原理から以下が成り立つ.

$$\mathbf{v}_{EI} \delta t = \mathbf{U}^T \mathbf{v}_a \delta t \quad (14)$$

また,  $\delta t = 0$  のとき式(12)の  $\delta \mathbf{x}_a$  が  $\mathbf{0}$  であるとすると式(2), (14)から以下が成り立つ.

$$\mathbf{x}_{EI} = \mathbf{B}_a^{-1} \mathbf{U}^T \mathbf{B}_a \delta \mathbf{x}_a, \quad (15)$$

$$\mathbf{x}_{EI} \triangleq \mathbf{B}_a^{-1} \mathbf{v}_{EI} \delta t, \quad \delta \mathbf{x}_a \triangleq \mathbf{B}_a^{-1} \mathbf{v}_a \delta t$$

いま  $\mathbf{r}_i$  先端の相対変位  $\mathbf{v}_{EI} \delta t$  によって外力と内力  $\mathbf{h}_{EI}$  が発生するとし, その関係を

$$\mathbf{K}_{hEI} \delta \mathbf{h}_{EI} = \mathbf{v}_{EI} \delta t \quad (16)$$

と表す.  $\mathbf{K}_{hEI}$  は力の偏差を相対変位に変換する対角行列である. 式(16)から, 物体に作用すべき外力と内力の目標値  $\mathbf{h}_E^d$ ,  $\mathbf{h}_I^d$  が与えられたとき,  $n$  本のロボットアームが  $\mathbf{r}_i$  先端に  $\mathbf{h}_E$ ,  $\mathbf{h}_I$  方向に沿って与えるべき相対変位  $\delta \mathbf{x}_{hEI}$  は以下のように求められる.

$$\delta \mathbf{x}_{hEI} = \mathbf{B}_a^{-1} \mathbf{K}_{hEI} (\mathbf{h}_{EI}^d - \mathbf{h}_{EI}) \quad (17)$$

ユーザーが  $\mathbf{r}_i$  先端に  $\mathbf{h}_E$ ,  $\mathbf{h}_I$  方向に沿った目標相対変位  $\mathbf{x}_{pEI}^d$  を指定するとき, 位置と力のハイブリッド制御則は以下で与えられる.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{EI}^c &= (\mathbf{I}_{6n} - \mathbf{S})(\mathbf{x}_{pEI}^d - \mathbf{x}_{EI}) + \mathbf{S} \delta \mathbf{x}_{hEI} \\ &= (\mathbf{I}_{6n} - \mathbf{S})(\mathbf{x}_{pEI}^d - \mathbf{x}_{EI}) + \mathbf{S} \mathbf{B}_a^{-1} \mathbf{K}_{hEI} (\mathbf{h}_{EI}^d - \mathbf{U}^{-1} \mathbf{h}_a) \end{aligned} \quad (18)$$

$\mathbf{S} \in \mathbf{R}^{6n}$  は力制御する軸を 1, 位置制御する軸を 0 で指定する選択行列である. 物体の位置とアーム間の内力を制御する場合は, 物体の目標位置・姿勢を  $\mathbf{x}_{pEI}^d$  で, 内力の目標を  $\mathbf{h}_{EI}^d$  で指定する.

式(3), (14)から,  $n$  本のロボットアームの目標関節角度は以下ようになる.

$$\mathbf{q}^d = \mathbf{J}^+ (\mathbf{U}^T)^{-1} \mathbf{B}_a \mathbf{x}_{EI}^c + \mathbf{q} \quad (19)$$

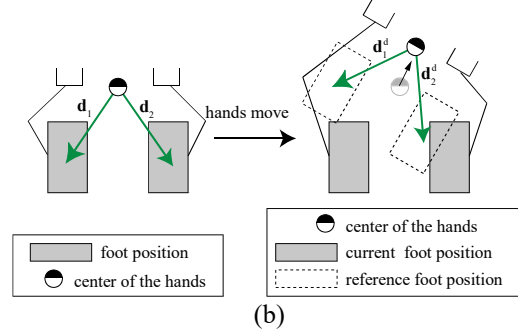
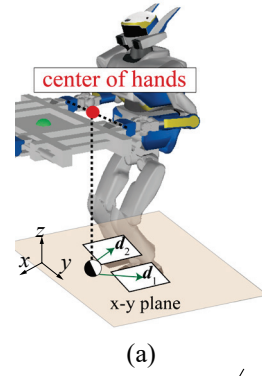


図5 オンライン歩容生成戦略

## (2) オンライン歩容生成技術の確立

図5にオンライン歩容生成の原理を示す. 最初にヒューノイドロボットが物体を把持した状態を初期状態とし, 両腕による把持点の中心を地面に投影した点から両足裏原点までのベクトル  $\mathbf{d}_1$ ,  $\mathbf{d}_2$  を求める (図5(a)). 物体に作用する外力 (または軌道) と内力の目標値が与えられると, 式(18), (19)で求めた  $\mathbf{q}^d$  を用いて順運動学  $\mathbf{x}_H^d = \mathbf{f}(\mathbf{q}^d)$  を解き, ハンドの目標位置・姿勢  $\mathbf{x}_H^d$  を求め,  $\mathbf{x}_H^d$  から  $\mathbf{d}_1^d$ ,  $\psi_1^d$ ,  $\mathbf{d}_2^d$ ,  $\psi_2^d$  を計算する (図5(b)).  $\psi_1^d$ ,  $\psi_2^d$  は足配置の  $z$  軸回りの角度 (ヨー角) である. 足配置の目標値と現在値の差

$$e_{pk} = \|\mathbf{d}_k^d - \mathbf{d}_k\|, \quad e_{Ak} = |\psi_k^d - \psi_k| \quad k=1,2 \quad (20)$$

が, あらかじめ設定する閾値以内であればアームのみで物体を操作し, 閾値を越えれば歩行を開始する. オンライン歩容生成には引用文献⑤の手法を用いた.

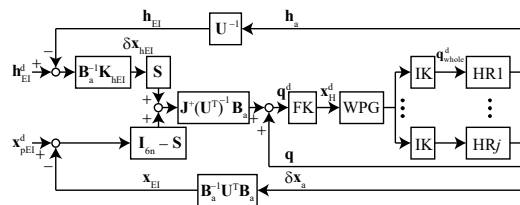
## (3) 脚移動を伴う複数ヒューノイドロボットの対称型協調制御則の構築

協調制御時には各ヒューノイドロボットは, 重心位置  $\mathbf{p}_{CoM} \in \mathbf{R}^3$ , 腰部姿勢  $\phi_w \in \mathbf{R}^3$ , 遊脚足先位置・姿勢  $\mathbf{x}_{Fsw} \in \mathbf{R}^6$ , 両手先位置・姿勢  $\mathbf{x}_{HL} \in \mathbf{R}^6$ ,  $\mathbf{x}_{HR} \in \mathbf{R}^6$  の24自由度を制御する.  $\mathbf{q}^{\text{whole}}$  を全身のジョイント角度とすると

$$\Delta \mathbf{q}^{\text{whole}} = \mathbf{J}^+_{\text{whole}} \Delta \mathbf{x}_{\text{whole}} \quad (21)$$

の関係が成り立つ. ここで

$$\Delta \mathbf{q}^{\text{whole}} = \mathbf{q}^{\text{whole}^d} - \mathbf{q}^{\text{whole}}, \quad \mathbf{J}^+_{\text{whole}} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{CoM} \\ \mathbf{J}_w \\ \mathbf{J}_{Fsw} \\ \mathbf{J}_{HL} \\ \mathbf{J}_{HR} \end{bmatrix}, \quad \Delta \mathbf{x}_{\text{whole}} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{CoM}^d - \mathbf{p}_{CoM} \\ \phi_w^d - \phi_w \\ \mathbf{x}_{Fsw}^d - \mathbf{x}_{Fsw} \\ \mathbf{x}_{HL}^d - \mathbf{x}_{HL} \\ \mathbf{x}_{HR}^d - \mathbf{x}_{HR} \end{bmatrix}$$



FK: Forward Kinematics, IK: Inverse Kinematics  
WPG: Walking Pattern Generator, HR<sub>j</sub>: jth Humanoid Robot

図6 位置/力ハイブリッド制御系

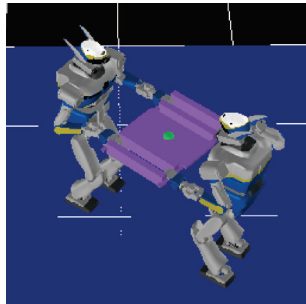
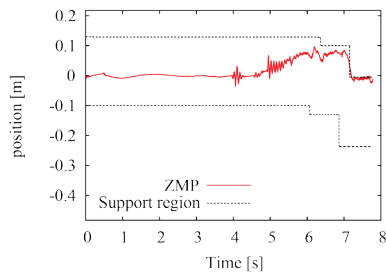
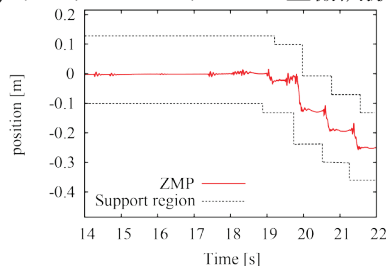


図7 OpenHRP3での検証



(a) リーダー・フォロワー型協調搬送



(b) 対称型協調搬送

図8 シミュレーションによる二つの協調制御の比較

である。各ベクトルの右上添字の  $d$  は目標値を表す。 $J_*$  はそれぞれのベクトルに対応するヤコビ行列である。図6に制御系のブロック線図を示す。

#### (4) 動力学シミュレータ OpenHRP3 での検証

図7に動力学シミュレータ OpenHRP3 による2台のヒューマノイドロボット HRP-2 協調搬送シミュレーションの様子を示す。図8には進行方向 ( $x$  軸) の足裏指示多角形と ZMP (Zero Moment Point) の結果を示す。(a)がリーダー・フォロワー型協調搬送の結果で、(b)が本研究で開発した対称型協調搬送の結果である。リーダー・フォロワー型協調搬送ではリーダーが先に動作を開始してからフォロワーが動作を開始するまでの時間差により、リーダーの ZMP がつま先側に移動し、7秒付近で指示多角形の縁に達し (図8 (a))、転倒

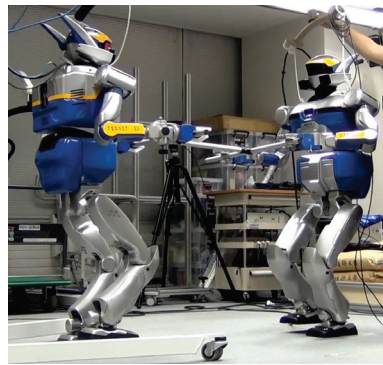


図9 HRP-2 での検証実験

した。一方、提案する対称型協調搬送では、2台のヒューマノイドロボットが同期して動作するため、ZMPは常に足裏指示多角形の中心付近にあり (図8 (b))、安定に搬送できている。このシミュレーションにより、対称型協調制御の優位性が示された。

#### (5) 遠隔操作コックピットの開発

実ヒューマノイドロボット HRP-2 で協調搬送実験を行うために、ジョイパッドで操作するシステムを開発した。ジョイパッドにより、物体 (図9のパイプ) の中心の位置と姿勢をジョイパッドで人間が操作する。人間の指令値は、式(18)の  $x_{Ei}^d$  における  $x_E^d$  に代入される。

#### (6) 2台のヒューマノイドロボットによる検証実験

図9に、2台のヒューマノイドロボット HRP-2 による検証実験の様子を示す。対称型協調制御により、安定に搬送することができていることを確認した。

#### <引用文献>

- ① O. Khatib et al., Coordination and Decentralized Cooperation of Multiple Mobile Manipulators, Journal of Robotic Systems, Vol. 13, No. 11, pp. 755-764, 1996.
- ② K. Kaneko et al., Humanoid robot HRP-2, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1083-1090, 2004.
- ③ K. Yokoyama et al., Cooperative Works by a Human and a Humanoid Robot, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2985-2991, 2003.
- ④ M.-H. Wu, A. Konno and M. Uchiyama, Cooperative Object Transportation by Multiple Humanoid Robots, Proc. of IEEE/SICE Int. Symp. on System Integration, pp. 779-784, 2011.
- ⑤ S. Kajita et al., Biped Walking Pattern Generation by using Preview Control of Zero-Moment Point, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1620-1626, 2003.

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① Ga-Ram Park, Atsushi Konno, Imitation Learning Framework based on Principal Component Analysis, *Advanced Robotics*, 査読有, Vol. 29, Issue 9, 2015, pp. 639-656, DOI:10.1080/01691864.2015.1007084
- ② Meng-Hung Wu, Shuhei Ogawa and Atsushi Konno, Symmetry Position/Force Hybrid Control for Cooperative Object Transportation With Multiple Humanoid Robots, *Advanced Robotics*, 査読有, Vol. 30, No. 2, 2016, pp. 131-149, DOI:10.1080/01691864.2015.1096212
- ③ 小水内俊介, 小貫督仁, 呉孟鴻, 辻田哲平, 近野敦, 軟弱地面における二脚ロボットの歩行安定化制御, *日本ロボット学会誌*, 査読有, 2017 (掲載決定)

[学会発表] (計5件)

- ① Meng-Hung Wu, Atsushi Konno, Shuhei Ogawa, Shunsuke Komizunai, Symmetry Cooperative Object Transportation by Multiple Humanoid Robots, Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 査読有, pp. 3446-3451, Hong Kong, China, May 31-June 5, 2014.
- ② 小貫督仁, 小水内俊介, 近野敦, ヒューマノイドロボットの不整地歩行のための軟弱地面動的沈下モデル, *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集*, pp. 3A1-C07(1)-(4), 2014.
- ③ 呉孟鴻, 小川修平, 近野敦, 複数ヒューマノイドロボットによる協調搬送作業のための対称型力/位置ハイブリッド制御, *日本ロボット学会学術講演会予稿集*, RSJ2014AC1B2-05, 2014.
- ④ Rajat Mittal, Atsushi Konno, Shunsuke Komizunai, Implementation of HOAP-2 Humanoid Walking Motion in OpenHRP Simulation, Proc. of the Int. Conf. on Computing Communication Control and Automation, 査読有, pp. 29-34, Pune, India, February 26-27, 2015, DOI:10.1109/ICCUBEA.2015.212
- ⑤ 小貫督仁, 小水内俊介, 辻田哲平, 近野敦, 着地位置制御によるヒューマノイドロボットの軟弱地面上姿勢安定化, *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集*, pp. 2A1-12a7(1)-(4), 2016.

[図書] (計1件)

- ① 近野敦, (株)近代科学社, ロボット制御学ハンドブック, 6.5章 複数アームの協調制御, 2017年9月発売予定

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://scc.ist.hokudai.ac.jp/research/humanoid/humanoid-j.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

近野 敦 (KONNO, Atsushi)  
北海道大学・大学院情報科学研究科・教授  
研究者番号: 90250688

### (2) 研究分担者

小水内 俊介 (KOMIZUNAI, Shunsuke)  
北海道大学・大学院情報科学研究科・助教  
研究者番号: 40708004