原子力災害対応ロボット **HELIOS X** の開発
(機構の設計と基本動作実験)野田 幸矢^{*1}, 広瀬 茂男^{*2}, 上田 紘司^{*3}, 中野 寿身^{*3}, 堀米 篤史^{*3}, 遠藤 玄^{*4}**Development of a mobile manipulator for nuclear plant disaster, HELIOS X**
(Mechanical design and basic experiments)Satsuya NODA^{*1}, Shigeo HIROSE^{*2}, Koji UEDA^{*3}, Hisami NAKANO^{*3}, Atsushi HORIGOME^{*3}
and Gen ENDO^{*4}^{*1} Department of Mechano-Micro Engineering, Tokyo Institute of Technology
4259-G5-27 Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 226-8503, Japan^{*2} HIBOT CORPORATION

Watanabe Corporation Building 4F, 5-9-15 Kitashinagawa, Shinagawa-ku, Tokyo 141-0001, Japan

^{*3,*4} Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Tokyo Institute of Technology
2-12-1 O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan

Received 9 September 2015

Abstract

In places such as nuclear power plant disaster area, which it is difficult for human workers to enter, robots are required to scout those places instead of human workers. In this paper, we present a mobile manipulator HELIOS X for a nuclear plant decommissioning task. Firstly, we address demands and specifications for the robot, considering the mission of reconnaissance. Then we outline the system of the robot, mainly focusing on the following mechanism: “Crank Wheel”, “Main Arm”, “Sphere Link Wrist”, “Camera Arm”, “Control System” and “System architecture”. Especially, we installed 3 degree of freedom “Camera Arm” on the “Main Arm”, in order to improve functionality of remote control system. This enables the operator to monitor both the gripper and its overall view of the robot. “Camera Arm” helps the operator to recognize the distance from an object to the gripper, because the operator can interactively move the viewpoint of the camera, and monitor from another camera angle without changing the gripper’s position. We confirmed the basic functionality of mobile base, “Main Arm” and “Camera Arm” through hardware experiments. We also demonstrated that HELIOS X could pass through the pull-to-open door with a substantial closing force when the operator watched camera view only.

Key words : Nuclear plant, Mobile manipulator, Crank leg, Sphere link wrist, Camera arm, Door open

1. 序 論

福島第一原子力発電所では現在廃炉作業が進められているが、そのすべての作業は30～40年がかかると言われている。事故現場は高い放射線量のため、人が近づくことができずロボットによる作業が強く求められている。廃炉作業はまず始めに現状を把握するための「調査」が必要であり、次に廃炉作業を円滑に進めるためにロボットや人が作業しやすい環境を整備する「環境構築」が行われる。

No. 15-00494 [DOI: 10.1299/transjsme.15-00494], J-STAGE Advance Publication date : 25 April, 2016

^{*1} 正員, 東京工業大学大学院総合理工学研究科 (〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259-G5-27)

^{*2} 正員, (株) ハイボット (〒141-0001 東京都品川区北品川 5-9-15 渡辺コーポレーションビル 4F)

^{*3} 東京工業大学理工学研究科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

^{*4} 正員, 東京工業大学理工学研究科

E-mail of corresponding author: noda.s.ab@m.titech.ac.jp

Fig. 1 HELIOS X

Table 1 HELIOS X Specification

Item	Value
Width × Length × Height	590 × 1200 × 630 mm
Mobile Base (Width × Length × Height)	590 × 1200 × 280 mm
Arm(extended)	1220 mm
Mass	51.7 kg
Speed on flat ground	1.7 m/s
Arm payload	100 N

ここでいう「調査」とは、ガンマ線カメラによる放射線量の計測、原子炉建屋の崩壊状況のカメラ画像による把握など、廃炉の実作業を計画・立案するための基礎的情報収集である。調査用ロボットとしてはこれまで、Packbot(Yamauchi, 2004), Quince (Nagatani et al., 2011), FRIGO-MA (加瀬, 森園, 2014) などが投入されており、原子炉建屋上部階内部のカメラ撮影や線量率計測が行われている。これらの調査用ロボットは、不整地踏破性が高く、搬入出も含めた機動性も高いことから、迅速に現場に展開可能である。

また「環境構築」とは瓦礫除去や除染など、ロボットや人が作業可能な環境を整えるものである。環境構築用ロボットとしてこれまでに、Warrior (iRobot Corporation, 2015), ASTACO-SORA (江川, 2014), MEISter (三菱重工業, 2015) などが投入されてきた。これらのロボットは瓦礫除去など、機械的に外部に仕事をする作業を伴うことから、調査用ロボットに比して高出力の移動能力や作業用アームを有しており、その結果、大きさ・質量なども大型である。

現在調査に基づき、順次環境構築が進められているが、今後調査用ロボットの作業性の向上は重要であると我々は考えている。実際、現在までに運用されている調査用ロボットではドアを開けて内部に進入したり、狭隘空間の瓦礫を除去して進入したりすることが困難でミッションを断念する場合があった(日刊工業新聞社, 2015), (東京電力, 2015)。Quince や Packbot に装備されたアームの仕様上のペイロードは 45N であり、ウエスによる高濃度汚染水の拭き取りなどの軽作業には十分であるが、ドア開けなどの作業には出力が不足するものと思われる。実際、我々はこれまでに調査用ロボットとして手先ペイロードが 80N である HELIOS IX (Ueda et al., 2011) を開発してきたが、アームの手先力不足でドア開扉作業に失敗することがあった。

以上から、我々は HELIOS IX での課題を元に図 1 と表 1 に示す、ドア開扉可能な作業性を持つ調査用ロボット HELIOS X を開発した。本論文では、開発にあたり検討した仕様、具体的機構とシステムについて述べるとともに、それらの実現性を確認するための基本的な実験について報告する。

本論文の構成は次の通りである。第 2 章では、調査用ロボットに求められる仕様とロボットへの要求について検討し、それらから設計方針を決定する。第 3 章では、設計方針をもとに具体的な機構とシステムの構成について述べる。第 4 章では、開発した HELIOS X が第 2 章の仕様を満たすことを確認するための室内実験について述べる。

2. HELIOS X のコンセプト

2.1 原子力発電所内部で求められる仕事

シビアアクシデント後の原子力発電所内部で調査作業するにあたり、具体的にどのような作業が求められるのか? これらについて、文献(浅間, 2011) や”NEDO(独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構) 災害対応無人化システム研究開発プロジェクト”の公募条件、原子力発電所作業従事者の手記 (IEEE SPECTRUM, 2015) を参考に検討した結果、以下の 6 つのタスクであると我々は考えた。

1. 遠隔操縦が可能であること

事故発生時の原子力発電所建屋内部は放射線量が高いことが想定されるため、人が現場に立ち入らずに作業できることが求められる。また、遠隔操縦を行うにあたり現状では、複雑で大掛かりな操縦卓を使わず小型で扱いやすいコントローラ（例えばゲーム用コントローラ）で作業できることが望ましい。将来的には、マスタースレーブシステムにも対応できることも考慮に入れている。

2. 幅 700mm の通路を通行できること

原子力発電所建屋内部の通路は狭く、上記の幅にも対応可能でなければならない。

3. 階段を踏破できること

原子力発電所建屋内部の階段の斜度は 45° 程度である。

4. ドアノブがあるドアを開けられること

現場の作業ではドアを開けてその中に侵入することが求められている。

5. 瓦礫除去能力があること

ロボットの進路を塞ぐ瓦礫で除去可能な程度に軽いものならば除去する。

6. カメラで周囲の状況を確認すること

カメラで原子力発電所建屋内部の状況が確認できることが望ましい。

2.2 タスクから考えられるロボットへの要求

上記のタスクをこなすためにロボットに求められる性能について検討する。具体的には以下の 8 つが必要になると考えられる。

1. 質量・サイズ

質量とサイズが大きい場合、ロボットを搬入するのが困難になる。そこで、二人程度の作業で運べる質量と大きさであることが望ましいと考えられる。

2. 作業能力

上記の通りドアノブ開閉などある程度多様なタスクをこなすアームが要求される。特に、マスタースレーブの使用も見据えると、人が直接現場で作業する場合と同等な力と速度の両方が求められると考えられる。

3. 移動能力

上記の条件をこなせるだけの移動能力を備えた移動機構が必要になると考えられる。また、このような不整地では転倒した状態からの復帰も可能であれば求められる。

4. カメラ

上記の任務を遂行するためには、当然ながらカメラを搭載する必要がある。

5. 通信

原子力発電所建屋の壁は鉄板で構成されているため、無線による通信が困難だと考察される。有線による通信を考えなければならない。

6. 防塵防水性

ロボットを繰り返し使う事が想定される。そのためには水洗いにも対応する構造（IP55 以上）であることが望ましい。

7. 操縦桿

原子力発電所事故現場に巨大な操縦桿システムを搬入するのは極めて困難である。そのため、市販のゲームコントローラなどコンパクトで入手しやすいもので操縦できることが望ましい。

8. メンテナンス性

文献(対災害ロボティクス・タスクフォース, 2015)によると、原子力発電所災害での放射線による故障として被曝積算量による劣化が支配的である。放射線対策を行わない場合、50[Gy] 程度が許容であると報告されている。特に、通信回路系の劣化が大きいと報告されている。この主な原因は γ 線によるものである。一般に γ 線を遮蔽するためには鉛などでロボット本体を覆う必要があり、二人程度で運べるロボット質量の範囲

で γ 線を遮蔽することは難しい。しかし、PackBot など特殊な対策を施さなくても文献に示すような(東京電力, 2015) 数百～数千 [mSv/h] の線量下において延べ数十時間以上偵察活動が実施可能である。そのため、比較的故障しやすい箇所に関して簡単に交換できるような構造が望ましい。

2.3 設計方針

前述の要求から以下のように設計方針を立てる。前述の 1～8 と下記の 1～8 はそれぞれ対応する。

1. 質量・サイズは二人で持つことを想定して、質量が 60 kg 運搬時のサイズが幅 600 mm 縦 1200 mm 高さ 600 mm に収まるようにする。
2. 作業能力を確保するため、広範囲に動かせるグリッパ付きの 6 自由度マニピュレータを搭載する。また、車体が転倒した状態からの復帰することや大出力での作業にアームを使用するため、位置決めの 3 自由度アクチュエータには他の箇所で使うアクチュエータよりも出力が大きいものを使用する。マニピュレータのペイロードは我々が開発してきた HELIOS IX(Ueda et al., 2011) において 80N では不足したため、HELIOS X では 100N とする。また、JIS 規格 A4702:2000 や文献(Moreno et al., 2014) より床からドアノブまでの高さが 800～1000mm にあるドアが多いため、これらのドアの開扉に対応できるようにする。ドアノブを水平方向に引く力は大きいほど良いが、手先力を無限大に発生させることは現実的に不可能である。HELIOS IX の設計経験上 80N での手先力で開扉を設計しても手先力不足で失敗することがあった。そこで、暫定的にドアノブを水平方向に引く力を 100N とする。この値は JIS 規格 4706:2000 で定める開閉力 50N に比して 2 倍の安全率となっている。
3. 移動台車には高い不整地踏破性と防塵・防水性を備えたクランク車輪を用いる。転倒時には上述のアームを駆使して復帰できるようにする。
4. 広範囲を監視できるように魚眼カメラを搭載する。
5. 無線通信では電波が届かないので有線通信で行う。それに伴い電源も外部から供給する。
6. 回転部などに O リングや V リングを使用し、防塵防水構造にする。
7. 一人で遠隔操縦を行えるようにする。コントローラは入手しやすい市販のゲームコントローラを使用する。
8. 故障しやすい箇所を集約しアクセスしやすいようにする。

さらに、追加の設計方針として、カメラ専用のアームを搭載することを提案する。一般に遠隔操縦をする上でカメラ画像を見ながら操縦するのは、実際に我々が目視で作業することよりも難しい。状況に応じてカメラの視点を移動させる装置が搭載されていれば、遠隔操縦性を向上させることが期待できる。そこで、カメラ視点を動かすための方法として、本体のアームと別にカメラ専用のアームを搭載する。

3. 具 体 的 設 計

3.1 移動機構

不整地を移動するレスキューロボットの移動機構として、クローラや車輪が用いられることが多い。このような場合、対地適応性を高めるため、Quince(Nagatani et al., 2011) や Packbot(Yamauchi, 2004) においてはクローラとフリッパアームが併用されている。しかし、クローラを移動機構に用いると異物がクローラベルトに挟まりスタックが発生する可能性がある。特に、瓦礫が多い箇所ではこのリスクが高いと考えられる。このような箇所では、離散的に接地点を選択できる多自由度の歩行ロボットが有効になる。このため、原子力災害対応ロボットの移動機構に四足歩行を採用した例(上原他, 2012) も存在する。しかし、歩行ロボットに関しては機構の複雑さに由来する信頼性の低下が課題である。

そこで本研究では、我々が開発したクランク車輪機構(Nakano and Hirose, 2012)を採用することにした。クランク車輪とは同期して回転する四輪駆動車の前輪と後輪にクランクを取りつけ、平行リンクをなすようにリンクつなげたものである。クランク車輪が前進すると、平行リンク部は図 2 の軌跡で移動し、あたかも足裏で押し付けるような運動を生成する。平地では平行リンク部は地面と接地しないので、車両全体は車輪で走行する。不整地においては平行リンク部が擬似的な足として歩行のような動作を行い高い踏破性を発揮する。四輪駆動車に平行リンクを取り付けるだけなので、構造も歩行ロボットやフリッパアーム付きのクローラと比較すると簡素である。

Fig. 2 Trajectory of crank-leg

Table 2 Specification of crank-wheel mobile platform

Item	Value
Weight	28.0 kg
Degree of freedom	2
Length	1100-1200 mm
Height	310-370 mm
Width	590 mm
Wheel diameter	200 mm
Wheel base	400 mm
Actuator	2×200 W Nidec60×20024
Reduction ratio	1/33
Speed on flat ground	1.7 m/s

Fig. 3 Structure of Crank Wheel robot

Fig. 4 Action of differential system

具体的な構造は図3のようになる。左右の脚部ユニットとそれらを結合するボディ部で構成されている。左右の脚部ユニットは、四輪車の不静定問題を弾性要素を持たない差動機構で解決している。これにより、アーム部を剛に支えることができる利点がある。動作の様子を図4に示す。左側ユニットの赤矢印の後方への回転は、反転ギヤとピニオンギヤを介して右側ユニットの青矢印回転に伝達される。脚部ユニット両側で動作する平行リンクとの干渉を避けるため、モータは上方に配置し、チェーンで前後輪に動力を伝達する。アームや計測機器などを搭載した状態の質量 60 kg の機体が人の歩く程度の速さで 300 mm の段差を上ることを想定し、200 W Nidec60×20024 モータを2つ用いる構成とした。遊星減速機2段とチェーンによって 33:1 の減速を行う。構成した移動機構の諸元を表2に示す。

3.2 メインアーム

これまで我々がレスキュー用として開発してきた HELIOS IX では図5に示すアーム構造であった。

Fig. 5 HELIOS IX structure

Fig. 6 HELIOS X structure

しかし、これらのアームには次のような問題点があった。

- 可動範囲が狭く、特にドアを開けて通過する際に操縦が困難であった
- アームの手先速度は十分であったが手先のペイロードが 80N では十分ではなく、ドアを開けられないことがあった。

そこで、本研究ではこれらを改善した図 6 に示すアーム構成にした。移動機構からグリッパまでを順に、第 1 関節、第 2 関節とし、移動機構から順にリンク節を第 1 リンク節としたとき、第 1 関節を Yaw 軸、第 2 関節、第 3 関節を Pitch 軸に配置する。第 4 関節は Roll 軸に配置し、第 5, 6 関節には後述する球面リンク機構を用いる。このようにすることで、アームの収納性を維持しつつ可動範囲を向上させる。第 3 関節を駆動させるアクチュエータを第 2 関節に配置し、タイミングベルトで動力を伝達する構成にする。これにより、直接第 3 関節上にアクチュエータを配置させるとときと比べ、機体全体の質量中心を低くし、車体の安定性を向上させることができる。

具体的構造を図 7 に諸元を表 3 に示す。アームの収納時の長さ 500 mm、最大進展時のアーム長さ 1220 mm として設計した。これによりドアノブを掴むことや扉の開閉に必要な十分な可動範囲を得ることができる。 θ_1 軸、 θ_2 軸間と θ_3 軸、 θ_4 軸間にはオフセットを設けており、アームをコンパクトに収納することができる。構造部材には主にガラス繊維強化プラスチックを使用しており、車体質量の軽量化によるアーム動特性向上に貢献している。アクチュエータには 200 W Nidec60×20024 を、減速機にはバックラッシュが少ないハーモニックドライブ (160:1) を各 3 つ使用している。 θ_4 軸には 40 W のブラシレスモータ (Maxon EC22) を一つ使用している。図 7 に示すようにタイミングベルトの間に制御回路を入れ容積効率を高めている。配線に関しては、アームの外側に出ないようにアーム内部を通してあり、回転部は中空軸にしてその中心を通してある。

これらの設計条件で、アーム先端で出しうる最大の力と速度をシミュレーションすると図 8 のようになった。このシミュレーションは移動機構が地面に固着したと仮定し θ_1 , θ_2 , θ_3 軸のモータを駆動させたときにアーム先端で出しうる力と速度を可動範囲内で求めたものである。モータの性能として定格トルクと定格回転数で駆動するとして計算した。またこれらの計算はキネマティクスのみを考慮し、アーム質量や慣性を無視して行った。この計算において座標系は図 6 の方向であり、図 8 に X, Y, Z 各々の力と速度を示す。座標原点に関しては、 θ_1 軸と地面との交点に定めている。Z 方向に付いてはアームの位置にも依存するが、全可動範囲内でおおよそ 200N 以上の力を出すことができる。また速度は全可動範囲内でおおよそ 1.0m/s 以上であり、人が腕を使って作業するのと同様であることを確認した。ドアの開閉動作に寄与する X, Y 方向の力は、全可動範囲内で 100N 以上であることを確認した。

3.3 球面リンク手首機構

我々が開発してきた HELIOS IX では、干渉駆動 (広瀬, 佐藤, 1988) を用いた 2 自由度手首機構を採用していた。具体的には、図 9 に示すように二つの θ_5 軸周りのアクチュエータの回転方向が同じならば手首は θ_5 軸周りに回転し、逆ならば手首は θ_6 軸周りに回転する。干渉駆動の効果で手先で 80 N 程度の重量物の運搬が可能であったが、一方で θ_6 軸方向の可動範囲が $\pm 19^\circ$ と狭く、ドア開閉の際には運動の制約が大きかった。

一方文献 (Ogata and Hirose, 2004) では、図 10 に示すように干渉駆動を用いた機構で大きな可動範囲 ($\theta_5: \pm 80^\circ$, $\theta_6: \pm 65^\circ$) を有する機構を歩行ロボット用の足首用途に開発してきた。しかし、この機構はジョイントの強度が

Table 3 Specification of Main Arm

Item	Value
Mass	19.8kg
Degree of freedom	6 (including forearm)
Workspace	$-180^\circ \leq \theta_1 \leq 180^\circ$
	$-180^\circ \leq \theta_2 \leq 0^\circ$
	$0^\circ \leq \theta_3 \leq 180^\circ$ (at $\theta_2 = 0$)
	$-180^\circ \leq \theta_4 \leq 180^\circ$
Actuator	200 W Nidec60×20024 ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) Maxon EC22 40 W (θ_4)
Reduction	Strain wave gearing, ratio:1/160 (HarmonicDrive®, $\theta_1, \theta_2, \theta_3$) Planetary gear, ratio:1/1320(θ_4)
Arm(Extended)	1220 mm
Arm(Inside)	500 mm
Maximum force	$f > 190$ N (X direction)
	$f > 100$ N (Y direction)
	$f > 190$ N (Z direction)
	(at the end of Main Arm)

Fig. 7 CAD drawing of Main Arm

HELIOS IX のジョイントと比較して低いいため、可搬重量が低下すると考えられる。

これらを踏まえ、我々は次の方針で設計をまとめた。

- 可搬重量を維持するため、基本的な構造は HELIOS IX の手首機構を踏襲する。
- θ_6 軸方向にも可動範囲を広げられるようリンクパラメータを調整する。

これらを満たす機構として本研究では球面リンク機構を採用する。球面リンク機構とはリンク機構のジョイントが仮想の球面上を運動するリンク機構である。本研究では、二つの θ_5 軸周りに回転するモータから θ_5 軸と θ_6 軸に運動を変換する球面リンク機構を用いている。この機構は、HELIOS IX の手首機構よりも設計パラメータが少ないため、可動範囲の最大化と特異点の解析を行いやすいという特徴を有する。

開発した球面リンクの構造を図 11 に、機構全体を図 12 に示す。球面リンク機構の中心部には、ハーモニックドライブに直結する二つの扁平型のブラシレスモータが向かい合わせに配置され、左右のリンクを駆動する。図 11 に示すジョイント u_L, u_R, v_L, v_R にはボールジョイントを採用している。理論上では、機構拘束上は一自由度回転対偶で十分であるが、ボールジョイントを用いることによりリンク l_2 の耐荷重を 500 N から 4500 N まで向上させることができる。リンクパラメータの図 11 の l_1, l_2, l_3, α に関しては、特異点解析をしてから θ_6 軸の運動が最大になるように調整し、表 4 に示す値にした。ボールジョイントと 1 自由度回転対偶の検討及びリンクパラメータの具体的な調整法に関しては文献 (Ueda et al., 2013) を参照されたい。

3.4 カメラアーム

これまで、単腕型マニピュレータを搭載したレスキューロボットにカメラアームが取り付けられている例は多い。Packbot や SAKURA II, HELIOS IX でもマニピュレータにカメラアームが搭載されている。

特に、HELIOS IX でカメラアームを搭載した経験から次の知見が得られた。

- カメラ視点が手首の姿勢とともに変化しない方が望ましい。手首の姿勢を変えることは頻繁に発生するため、カメラ視点が姿勢を変換するたびに變更され、操縦者にとって負担になるためである。
- カメラ情報だけではカメラの奥行きを失うので、カメラ奥行き方向にグリッパを操縦して位置合わせをするのが難しい。
- カメラ画像でロボット全体と周辺の様子が監視できることが望ましい。遠隔操縦において、移動機構の状態と周辺環境を把握することで操縦者が状況を認識しやすくする。このアイデアは我々が開発してきた他のレスキューロボット (Arai et al., 2008) などでも採用されている。

そこで、本研究では次の方針で設計する。

Fig. 8 Maximum force and velocity in the XYZ direction (the direction of coordinate system is the same as figure 6)

Fig. 9 HELIOS IX wrist

Fig. 10 Two DoF coupled drive ankle mechanism

Fig. 11 2 DoF spherical parallel mechanism

Fig. 12 HELIOS X wrist

Table 4 Specification of HELIOS X wrist

Item	Value
Mass	2.3 kg (including forearm)
Degree of freedom	2
Workspace	$-120^\circ \leq \theta_5 \leq 100^\circ$ $-75^\circ \leq \theta_6 \leq 75^\circ$
Actuator	Brushless DC motor 30 W (Maxon EC 45 flat)
Reduction	Strain wave gearing, ratio:1/100 (HarmonicDrive® CSD-17)
Output torque (at $\theta_5 = \theta_6 = 0$)	Pitch : 7.8 Nm Yaw : 9.8 Nm
Link parameters	$l_1 : 42^\circ, l_2 : 74^\circ, l_3 : 50^\circ, \alpha : 40.8^\circ$

- 手首の姿勢変化でカメラ視点が動かないようにするため、図 13 に示すようなカメラアームを第 3 リンク節上に取り付ける。
- グリッパを複数方向から監視できるようにすることで立体感を得やすくする。具体的には、カメラでグリッパを図 13 の矢印とドットとクロスに示す方向に近接した角度から確認できるようにする。このように複数方向から監視することで、単一方向から監視するときよりもグリッパと監視対象物との奥行き感覚を得やすくする。また、ある視点において監視対象物がグリッパの影に隠れる場合でも、カメラの視点を別の場所に移動させてグリッパの影にならない方向から対象物を監視することができる。
- カメラ視点を上にしたときに車体移動機構と周辺を確認できるようにする。

次にカメラアームの仕様について検討する。

- 自由度：自由度を増やせばあらゆる方向から見やすくなるが、カメラアームを操縦するのが複雑になる。そこで、なるべく少ない自由度で上記のことを達するため
カメラの視点を変える自由度を 2
カメラの視野角を擬似的に拡大する自由度を 1
合計：3 自由度にする。
- 使用するカメラ：上記の自由度の話と関連してなるべく広範囲の状況を把握しやすくするため、魚眼レンズカメラ（オプト株式会社、OPT-MN33、視野角 210°）を用いる。このカメラは魚眼カメラであるが、ソフトウェア画像処理により魚眼カメラから切り取った画像を通常の写真のように再現する機能がある。
- 動作範囲：表 5 に示す値とする。

次に、カメラの視点を動かすためのリンク機構について検討する。代表的な方法として、図 14 に示すようなシリアルリンクで構成する方法とパラレルリンクで構成する方法が考えられる。一般的にはシリアルリンクで構成する方法が簡単である。しかし、この方法の問題点として小型・軽量で比較的剛性の高いものを作るのが難しい。そこで、本研究ではカメラの視点を移動させるのにパラレルリンクを使用することにした。

カメラアームの構成を図 15 と図 16 に諸元を表 5 に示す。カメラアームは二つの直動型伸縮ユニットとメインユニットの一自由度の姿勢調整機構から構成される。メインユニットがメインアームの第 3 リンク節とユニバーサルジョイントでつながっており、直動型伸縮ユニットが第 3 リンク節とメインユニットに対してそれぞれユニバーサルジョイントでつながっている構造である。左右の直動型伸縮ユニットを同方向に伸縮させるとカメラアーム先端は ϕ_1 方向に回転し、左右伸縮ユニットを互い違いに伸縮させるとカメラを ϕ_2 方向に回転させることができる。メインユニットは直動部とワイヤ、プーリ、バネから構成される。直動型伸縮ユニットとメインユニットの直動部は、モータの回転をボールネジで直動に変換する構造である。

Table 5 Specification of Camera Arm

Fig. 13 Camera Arm position

Item	Value
Width × Length × Height	110 × 690 × 170 mm
Mass	1.6 kg
Degree of freedom	3
Workspace	$0^\circ \leq \phi_1 \leq 90^\circ$ $-20^\circ \leq \phi_2 \leq 20^\circ$ $0^\circ \leq \phi_3 \leq 120^\circ$
Actuator	Maxon RE 13 3 W (Linear Unit) Maxon RE 10 1.5 W (Main Unit)
Reduction ratio	1/17 (Linear Unit) 1/16 (Main Unit)
Output Speed (at $\phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = 0$)	ϕ_1 : 18 deg/s ϕ_2 : 18 deg/s ϕ_3 : 35 deg/s

(a)Serial linkage

(b)Parallel linkage

Fig. 14 Structure of Camera Arm

Fig. 15 Camera Arm structure(red cylinders show linear actuators)

Fig. 16 Camera Arm all

3.5 制御システム

制御系統図を図 17 に示す。運動学や逆運動学の計算を PC で行う。PC から HELIOS X メインコントローラ (マイコン) へは USB-シリアル通信で角度の指令値のデータを送信している。今回、プログラム書き換えを容易にするため、また現時点において室内実験だけで機能を確認するため、USB-シリアル通信で PC からデータ送信をしている。HELIOS X 内部ではメインコントローラのマイコン (SH7047) がそれぞれモータドライバを駆動するマイコン (SH7047) へ CAN の bus 通信でつながっている。各軸のマイコン (SH7047) はメインコントローラから送ら

Fig. 17 HELIOS X system architecture

Fig. 18 Operation panel

れる角度の指令値をもとにPID制御でモータを制御する。末端のマイコンのプログラムをなるべく統一化し、各軸をPCで制御することでプログラムの開発を容易に行えるようにしている。

3.6 操縦画面・インターフェース

操縦インターフェースの構成としてはノートPC一台と市販ゲームコントローラ(Wiiリモコン、任天堂)から構成される。

PC画面には3Dグラフィックスでメインアームの姿勢がリアルタイムで更新されて表示される。また、カメラアームのカメラからの情報も表示され、静止画や動画の撮影が可能である。

コントローラは市販で入手が容易なWiiリモコンとヌンチャクを使用している。操縦者は片手でWiiリモコンを操作し、反対側の手でヌンチャクを操作する。これはHELIOS IXのシステム(Ueda et al., 2011)を踏襲したものである。Wiiリモコンとヌンチャクにはそれぞれ3軸加速度センサが搭載されており、操縦者の両方の手首の姿勢を認識できる。HELIOS IXではヌンチャク側の3軸加速度センサを利用しロボット手首の姿勢を制御した。HELIOS Xではヌンチャクのジョイスティックで移動機構の制御を行い、Wiiリモコン本体のボタンでアームの制御を行う。精密な作業とスピード作業の両方に対応するため、ヌンチャクの特定のボタンを押したときのみ高速でメインアームを動かせる。本研究では、Wiiリモコンを使用したが必要に応じてゲームパッドコントローラにも変更可能である。

4. 基本的動作の確認

4.1 走行試験

第2章で述べた移動性能が出せるかどうかのテストを行った。動作試験としては、クランク車輪単体での試験とメインアームを搭載した状態での試験である。

メインアームを搭載しない状態で砂地での動作、瓦礫の上での動作を行った。砂地での動作を図19に示す。この実験は中田島砂丘(静岡県浜松市)にて行われたものである。クローラではスタックしやすい砂地を、平行リンクで砂地を下に押し付け、歩行のような動作で移動している。瓦礫の上を走行する様子を図20に示す。瓦礫の上でも従来のクローラに比べ同様な走破性があることを確認した。

メインアーム搭載時では平地走行と階段踏破の実験を行った。平地走行では、加減速でバランスを崩すことなく発進停止させることができた。階段昇降の様子を図21に示す。使用した階段は斜度30°蹴り上げ高さが170 mmであった。2.0 mの高さを階段上昇するのに要する時間は4分40秒であった。階段の走行に関しても、メインアームを折り畳んだ状態でメインアームの操縦をせずに踏破することができる。従来の移動機構では、階段を登り始めるときにフリッパやアームを地面に押し付け車体を持ち上げるなどの動作が必要なものが多いが、30°の階段において本移動体ではそのような準備動作が必要ではない。

また第2章で目標に掲げた45°の階段についても踏破実験を行った。使用した階段の蹴り上げ高さは150 mm全

Fig. 19 Crank Wheel goes on sand

Fig. 20 Crank Wheel goes on rubble

Fig. 21 HELIOS X goes stairs up

体高さ 750 mm で実験を行った。メインアームを収納した状態で踏破実験を 2 回行ったところ、いずれも車体が転倒する危険が生じたため実験を中断せざるを得なかった。しかし、メインアームを展開し重心を階段昇段方向に移動させると踏破することができた。この実験の様子を図 22 に示す。この実験に関しては 3 回行い、2 回踏破に成功した。

これらのことを考慮すると、第 2 章で述べてきた移動性能を満たすものだと考えられる。

4.2 メインアームの出力確認

メインアームが第 2, 3 章で定めた仕様の力を出せるか、確認実験を行った。ドアを開ける姿勢を想定し、 θ_1 軸と地面との交点を原点として $X=400\text{mm}$, 床面からの高さ $Z=800\text{--}1000\text{mm}$ において X, Y, Z 方向に静的に 100N の

Fig. 22 HELIOS X goes 45° stairs up

Fig. 23 HELIOS X can pull 100N load

荷重をバネばかりで加え、荷重をかけてもアームの姿勢を維持できることを確認した（図 23）。またメインアーム先端に 10kg の質量を取り付け、メインアーム先端を Z=800-1000mm で水平に位置制御で駆動させた。その結果、図 24 に示すようにメインアーム先端を問題なく駆動させることができた。さらに、このように荷重がかかっても車体がバランスを崩して転倒することはなかった。これらのことから第 2 章で示したペイロード 100N が達成できることを確認した。

4.3 カメラアームの動作実験

表 5 に示す可動範囲内で、カメラアームの動けない特異姿勢があるかどうかの確認を行った。カメラアームの直動ユニットを位置制御で駆動させた。その結果、図 25 に示すようにカメラアームを動かすことができた。表 5 で設定した範囲内では、特異姿勢はないことを確認した。これらのことから、このカメラアームの機構は問題なく動作させることができる。

4.4 カメラアーム視野の確認

カメラアームに配置されたカメラが二章での偵察目的で機能するかどうかの検証を行った。その結果を図 26 に示す。カメラアームを直立させ、チルト機構でカメラを上向きに向けると周囲の環境を全方位で確認できる。また、カメラを下に向けると車体全体と周囲の環境の対応を確認することができる。

Fig. 24 HELIOS X can lift 100N load

Fig. 25 Camera arm in operation (upside: lateral motion, downside: vertical motion)

Fig. 26 Views from camera (where camera arm takes upright position)

Fig. 27 HELIOS X is grasping door knob(left side photo shows top view and right side photo shows side view)

4.5 ドアノブ把持実験

ドアノブをつかもうとする際のカメラ視線の状態を確認した。実験環境は次の通りである。ドアの前に HELIOS X を配置する。操縦者は HELIOS X を操縦し、マニピュレータ先端のグリッパでドアノブをつかめるようにメインアームを動かす。HELIOS X のメインアーム先端のグリッパがドアに接近したところで、操縦者はメインアームの姿勢を固定する。操縦者はカメラアームを動かして、カメラ視点がグリッパを上から眺める視点と右横から眺める視点になるようにして静止画を撮影した。

その結果を図 27 に示す。左側が上からのカメラ画像であり右側が横からのカメラ画像である。左側のカメラ画像からだけだと、操縦者がマニピュレータを操縦してグリッパとドアノブの高さ方向を合わせるのが難しいと考えられる。しかし、右側のカメラ画像を見ると、グリッパとドアノブとの高さ方向の関係がわかりやすくなる。これにより、容易に把持を行うことが可能であった。

4.6 開扉・通過実験

移動機構とメインアームとカメラシステムを組み合わせた総合的な性能を確認するためカメラ情報と操縦画面だけを使用し、ドアを通り抜ける実験を行った。

実験条件として、ドアは一般的なレバーハンドルがあるドアであり、内開きの方向で実験を行った。ドアを開けるのにはドアノブのところで最大 40 N 以上力を出すことが必要なドアである。操縦は熟練した人が行った。操縦者は HELIOS X からのカメラ画像のみの情報を見ており、直接 HELIOS X を見ていない。

手順は文献 (Ueda et al., 2011) と同様の手順である。この作業において、カメラ情報を (i) ドアとグリッパの相対位置を把握する (ii) クランク車輪にドアが引っ掛けられているかどうかを確認するのに使用した。具体的手順は以下の通りである。

1. ドアの前へ移動する。
2. カメラアームをグリッパの横や真上に移動させ、カメラでドアノブとグリッパの相対位置を把握する。
3. ドアノブを回転させドアを引張る。
4. 移動機構を後退させつつ回転させクランク車輪の間にドアを挟む。このとき、カメラの視点はクランク車輪とドアが見えるように下に視線を向ける。
5. さらに、移動機構を後退させつつ回転させつつ、メインアームを移動機構前方向にのぼしさらにドアを開く。
6. 移動機構を回転させつつメインアームを移動機構の回転方向と反対方向に回転させ外側のクランクにドアを引っ掛ける。
7. 移動機構を回転させ、出口の方向に向けそのまま前進しドアを通過する。

この実験を行った結果、図 28 に示すようにカメラ画像の情報だけでドアの通り抜けが行えることを確認した。HELIOS X が通過している様子を図 28 の左側に示す。実験中操縦者は左側に示すような全体像を一切確認せずに、右側の画像のみを見ながら操縦している。操縦時間は操縦者の熟練度合いに依存するが、十分に習練した操縦者の場合、本実験では完全にドアの通り抜けにかかった時間は 4 分であった。この結果は 20 回程度練習を行ってから、一回の通過実験を行ったときの時間である。

この結果より、HELIOS X の性能として内開きのドア通り抜け動作を行う能力があることが確認できた。今回操縦者は練習を積み重ねてから本実験を行ったが、実際にロボットを投入する際もあらかじめ、操縦訓練を十分にを行った後実際の現場で使用が想定される。このため、操縦者が練習を積み重ねて操縦した今回の実験状況は実際の現場に即したものであると考えている。

従来の HELIOS IX のレーザレンジファインダを使い操縦をアシストする方式 (Ueda et al., 2011) だけではドアの滑りや左右クローラ間にドアを保持できることを操縦画面から認識するのが難しいが、今回のロボットシステムではメインアームを保持した状態でカメラを動かせるため逐次動作を操縦画面から確認することができる。さらに、カメラを横にも移動できることで特にドアノブを掴む時にしっかりと掴めているかどうかを他の手法と比べ確認しやすいと考えられる。操縦時間に関しても HELIOS IX が本実験で使用したドアを通り抜ける時間が 4 分であるので、複雑なアシストシステムがなくてもカメラ視点を動かすだけでほぼ同等な効果があると考えられる。また、文献 (Toda et al., 2014) によると、ドアクローザのない内開きドアの通り抜けに約 4 分 20 秒要している。これに対し、本研究で使用したドアはドアクローザを有する。以上より提案するの HELIOS X は文献 (Toda et al., 2014) の場合より厳しい条件でドアを開けられると考えられる。

5. 結 論

シビアアクシデント後の原子力発電所内部の調査業務をするためのロボット HELIOS X を開発するにあたり、具体的に偵察業務を検討し、ロボットへの要求と設計方針を決定した。これらの要求を満たすための個々の具体的構成 (移動機構、メインアーム、球面リンク手首機構、カメラアーム、操作系、コントローラ、通信システム) について概説した。室内の実験ではあるものの、移動機能やカメラ機能について基本的な確認を行ったのち、最後にドアの通り抜け実験を行いハードウェアの性能がドアを通過して調査活動を行うのに十分な機能を有することを確認した。今後の展望であるが、以下の 2 つのことが考えられる。

一つは現場を模擬した設備で動作テストをさらにに行い信頼性を向上させることが重要である。

Fig. 28 HELIOS X opens door(left side shows overview that the operator did not watch, while right side shows camera arm view that the operator only watched)

もうひとつは、遠隔操縦性をさらに向上させるための手法の開発も必要である。レーザレンジファインダでの3D スキャンやマスタースレーブを駆使しての作業、また、我々は簡単に持ち運びができ力フィードバックもできるアームレストジョイスティック (Ishida et al., 2012) を開発してきたので、それらを連動させた操縦性の向上が考えられる。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、ロボット製作の協力・助言に尽力いただいた東京工業大学の石田悠朗氏と EN 工場の伊能崇雄氏に感謝する。

文 献

- Arai, M., Tanaka, Y., Hirose, S., Kuwahara, H. and Tsukui, S., Development of “Souryu-IV” and “Souryu-V:” serially connected crawler vehicles for in-rubble searching operations. *Journal of Field Robotics*, Vol.25, No.1 (2008), pp.31-65.
- 浅間一, 東日本大震災および福島第一原子力発電所事故におけるロボット技術の導入 (その 1), *日本ロボット学会誌*, Vol.29, No.7 (2011), pp.658-659.
- 江川栄治, 小型双腕重機型ロボット「ASTACO-SoRa」(<特集> 福島原発事故対応および廃炉のためのロボット技術), *日本機械学会誌*, Vol.117, No.1151 (2014), pp.682-683.
- 広瀬茂男, 佐藤幹夫, 多自由度ロボットの干渉駆動, *日本ロボット学会誌*, Vol.7, No.2 (1988), pp.128-135.
- IEEE SPECTRUM, Fukushima robot operator writes Tell-All blog (online), available from <<http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/industrial-robots/fukushima-robot-operator-diaries>>, (参照日 2015 年 4 月 4 日).
- iRobot Corporation, iRobot 710 Warrior(online), available from <<http://www.irobot.com/media/Files/Robots/Defense/Warrior/iRobot-710-Warrior-Specs.pdf>>, (参照日 2015 年 6 月 25 日).
- Ishida, H., Hagiwara, T., Ueda, K. and Hirose, S., Armrest joystick -mechanism design and basic experiments-, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems* (2012), pp.5119-5124.
- 三菱重工, MHI-MEISTeR (online), available from <<https://www.mhi.co.jp/news/story/1212065290.html>>, (参照日 2015 年 4 月 4 日).
- 加瀬隆明, 森園竜太郎, FRIGO-MA の紹介 (<特集> 福島原発事故対応および廃炉のためのロボット技術), *日本機械学会誌*, Vol.117, No.1151 (2014), pp.678-679.
- Moreno, J., Martínez, D., Tresanchez, M., Teixidó, M., Casanovas, J. and Palacín, J., A combined approach to the problem of opening a door with an assistant mobile robot, *Ubiquitous Computing and Ambient Intelligence. Personalisation and User Adapted Services*(2014), pp.9-12.
- Nagatani, K., Kiribayashi, S., Nishimura, T., Hada, Y., Okada, Y., Tadokoro, S., Yoshida, T. and Koyanagi, E., Redesign of rescue mobile robot Quince. *Proceedings of the 2011 IEEE/RSJ International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics* (2011), pp.13-18.
- Nakano, H. and Hirose, S., Crank-wheel: a brand new mobile base for field robots. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems* (2012), pp.4608-4613.
- 日刊工業新聞社, ロボナブル (online), available from <<http://www.robonable.jp/news/2012/07tepco-0706.html>>, (参照日 2015 年 6 月 25 日).
- Ogata, M. and Hirose, S., Study on ankle mechanism for walking robots -development of 2 d.o.f. coupled drive ankle mechanism-, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol.4 (2004), pp.3201-3206.
- 対災害ロボティクス・タスクフォース, 対災害ロボティクス・タスクフォースの公式ブログ (online), available from <<https://roboticstaskforce.wordpress.com/2011/04/10/%E3%83%AD%E3%83%9C%E3%83%83%E3%83%88%E3%81%AE%E8%80%90%E6%94%BE%E5%B0%84%E6%80%A7/>>, (参照日 2015 年 12 月 22 日).
- Toda, K., Yamato, K., Kodachi, T., Shimizu, M., Nishimura, T., Yoshida, T. and Fruta, T., Camera arm system for disaster response robots, *International Conference on Design Engineering and Science* (2014), pp.80-85.
- 東京電力, サーベイマップ (online), available from <<http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/f1/surveymap/images/f1-sv3-20130315-j.pdf>>, (参照日 2015 年 12 月 22 日).

- Ueda, K., Guarnieri, M., Inoh, T., Denet, P., Hodoshima, R., Fukushima, E. and Hirose, S., Development of HELIOS IX: an arm-equipped tracked vehicle, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.23, No.6 (2011), pp.1031-1040.
- Ueda, K., Yamada, H., Ishida, H. and Hirose, S., Design of large motion range and heavy duty 2-dof spherical parallel wrist mechanism, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.25, No.2 (2013), pp.294-305.
- 上原拓也, 菅沼直孝, 松崎謙司, 徳永泰明, 落合誠, 寺井藤雄, 鈴木淳, 災害現場向け遠隔作業ロボットの開発 (1) 原子炉建屋内調査への4脚ロボットの適用, *日本原子力学会 年会・大会予稿集* (2012), p.221.
- Yamauchi, B., Packbot: a versatile platform for military robotics, *Defense and Security* (2004), pp.228-237.

References

- Arai, M., Tanaka, Y., Hirose, S., Kuwahara, H. and Tsukui, S., Development of “Souryu-IV” and “Souryu-V:” serially connected crawler vehicles for in-rubble searching operations, *Journal of Field Robotics*, Vol.25, No.1 (2008), pp.31-65.
- Asama, H., Utilization of robot technology for the Great Eastern Japan Earthquake and the accident of Fukushima Daiichi nuclear power plant and its future issues (1), *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.29, No.7 (2011), pp.658-659 (in Japanese).
- Egawa, E., Dual-arm heavy machinery-type robot “ASTACO-SoRa”, *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol.117, No.1151 (2014), pp.682-683 (in Japanese).
- Hirose, S. and Sato, M., Coupled drive of the multi-dof robot, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.7, No.2 (1988), pp.128-135 (in Japanese).
- IEEE SPECTRUM. Fukushima robot operator writes Tell-All blog (online), available from <<http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/industrial-robots/fukushima-robot-operator-diaries>>, (accessed on 4 April, 2015).
- iRobot Corporation, iRobot 710 Warrior (online), available from <<http://www.irobot.com//media/Files/Robots/Defense/Warrior/iRobot-710-Warrior-Specs.pdf>>, (accessed on 25 June, 2015).
- Ishida, H., Hagiwara, T., Ueda, K. and Hirose, S., Armrest joystick -mechanism design and basic experiments-, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems* (2012), pp.5119-5124.
- Kase, T. and Morisono, R., Introduction of FRIGO-MA, *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol.117, No.1151 (2014), pp.678-679 (in Japanese).
- MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES. MHI-MEISTeR (online), available from <<https://www.mhi.co.jp/news/story/1212065290.html>>, (accessed on 4 April, 2015) (in Japanese).
- Moreno, J., Martínez, D., Tresanchez, M., Teixidó, M., Casanovas, J. and Palacín, J., A combined approach to the problem of opening a door with an assistant mobile robot, *Ubiquitous Computing and Ambient Intelligence. Personalisation and User Adapted Services* (2014), pp.9-12.
- Nagatani, K., Kiribayashi, S., Nishimura, T., Hada, Y., Okada, Y., Tadokoro, S., Yoshida, T. and Koyanagi, E., Redesign of rescue mobile robot Quince, *Proceedings of the 2011 IEEE/RSJ International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics* (2011), pp.13-18.
- Nakano, H. and Hirose, S., Crank-wheel: a brand new mobile base for field robots, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems* (2012), pp.4608-4613.
- NIKKAN KOGYO SHIMBUN, LTD., robonable (online), available from <<http://www.robonable.jp/news/2012/07tepco-0706.html>>, (accessed on 25 June, 2015) (in Japanese).
- Ogata, M. and Hirose, S., Study on ankle mechanism for walking robots -development of 2 d.o.f. coupled drive ankle mechanism-, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol.4 (2004), pp.3201-3206.
- Robotics Task Force for Anti-Disaster. The official blog of robotics task force for anti-disaster (online), available from <<https://roboticstaskforce.wordpress.com/2011/04/10/%E3%83%AD%E3%83%9C%E3%83%83%E3%83%88%E3%81%AE%E8%80%90%E6%94%BE%E5%B0%84%E6%80%A7/>>, (accessed on 22 December, 2015) (in Japanese).
- Toda, K., Yamato, K., Kodachi, T., Shimizu, M., Nishimura, T., Yoshida, T. and Fruta, T., Camera arm system for disaster response robots, *International Conference on Design Engineering and Science* (2014), pp.80-85.
- Tokyo Electric Power Company, Incorporated, surveymap (online), available from <<http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/f1/surveymap/images/f1-sv3-20130315-j.pdf>>, (accessed on 22 December, 2015) (in Japanese).

Noda, Hirose, Ueda, Nakano, Horigome and Endo, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.82, No.837 (2016)

Japanese).

Ueda, K., Guarnieri, M., Inoh, T., Denet, P., Hodoshima, R., Fukushima, E. and Hirose, S., Development of HELIOS IX: an arm-equipped tracked vehicle, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.23, No.6 (2011), pp.1031-1040.

Ueda, K., Yamada, H., Ishida, H. and Hirose, S., Design of large motion range and heavy duty 2-dof spherical parallel wrist mechanism, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.25, No.2 (2013), pp.294-305.

Uehara, T., Suganuma, N., Matsuzaki, K., Tokunaga, Y., Ochiai, M., Terai, F. and Suzuki, J., Development of remote control robot at disaster site, Atomic Energy Society of Japan (2012), p.221 (in Japanese).

Yamauchi, B., Packbot: a versatile platform for military robotics, Defense and Security (2004), pp.228-237.