

階層型 Non Terrestrial Network と そのアプリケーションに関する考察

周 恩平¹ 藤橋 卓也¹ 猿渡 俊介¹ 小林 真² 西 正博² 渡辺 尚¹

概要：近年、第6世代携帯電話網(6G)の次世代ネットワークの重要な新たな要素として、Non Terrestrial Network(非地上系ネットワーク, NTN)が注目されている。本稿では、複数の層からなる階層型 NTN とその応用に関して検討する。まず、階層型 NTN の基本について述べる。その後 LEO 衛星を用いた NTN の通信容量を計算し、東京、北京等の都市や南シナ海上の船舶の具体的な人口密度に対する単位面積当たりに必要な通信容量を求め、続いて、NTN のアプリケーションとして、XR も含めたマルチメディア通信、土砂災害センシング、海洋上通信を検討する。

1. はじめに

近年、第5世代ネットワーク(5G)を超える第6世代ネットワーク(6G)の重要な要素として Non-Terrestrial Network(非地上系ネットワーク, NTN)が注目されている。The 3rd Generation Partnership Project(3GPP) Release 16 [1]では、6Gに向けた NTN のベースネットワークアーキテクチャが提起され、主に無線層の問題と関連する解決法が提示されている。今後もさらに多くの議論がなされると予測される。

階層型 NTN は、図1に示すように、静止軌道(Geostationary Earth Orbit, GEO)衛星、中軌道(Medium Earth Orbit, MEO)衛星、低軌道(Low Earth Orbit, LEO)衛星、そして、High Altitude Platform(HAP), Unmanned Aerial Vehicle(UAV) および User Equipment(UE)の6層からなる非地上設備と地上設備で構成される [2] [3]。

本研究では、階層型 NTN の衛星通信容量とアプリケーションに関して考察する。具体的には、まず LEO 衛星容量について Amazon, SpaceX 等で示されている設定データを用いて、実際の人口密度に基づいた LEO 通信容量を分析する。次に、NTN のアプリケーションとして、マルチメディアデータ通信、土砂災害センシングおよび海洋上通信について考察する。

本稿は以下のように構成されている。第2節では、背景を述べる。第3節では、人口密度に基づいた LEO 通信容量の評価と分析を行う。第4節では、マルチメディア、土砂災害センシング、海洋上通信の3点から NTN の応用に

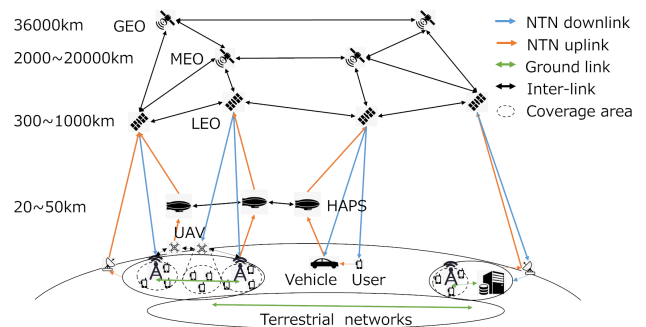


図1: 階層型 NTN

について考察する。第5節でまとめとする。

2. 背景

GEO 衛星は、高度約 36000 km の軌道にある静止衛星である。高度が高いため3つの衛星で地球全体をカバーできる。MEO や LEO に比べて衛星数が少ないため、コスト上の利点がある。また、古くから開発・運用されてきた実績がある。一方で、片道約 120msec の伝搬遅延が生じる欠点を有する。従って、5G 以前では特に民生用の通信基盤としては、あまり大きな要素ではなかった。しかし、今後の NTN では、MEO 衛星や LEO 衛星のオフロードの役割を担う可能性がある。

MEO 衛星は高度 2000~20000 km で動作する。GEO 衛星に比べ、伝搬遅延が 7 msec~70 msec と小さい一方で、地球全体をカバーするには GEO に比して多くの衛星が必要である。数 10 msec の伝搬遅延は、オンボード処理や地上局でのアプリケーション処理を考えた場合、6G 通信の要件を満たさない可能性がある。

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科

² 広島市立大学大学院情報科学研究科

LEO 衛星の高度は 300~1000 km であり、伝搬遅延は 1 msec~4 msec である。LEO 衛星は、トランスペアレント衛星と再生型衛星の 2 つのカテゴリに分類できる。トランスペアレント衛星は、アナログ RF リピーターと同等の機能であり、LEO 衛星とゲートウェイ（例えば、他の LEO 衛星や MEO 衛星）の間のリンク（フィーダーリンク）から受信した信号を増幅し、LEO 衛星と UE との間のリンク（サービスリンク）に送信する。これに対し、再生型衛星は、受信した信号をオンボードで処理し、送信できる。オンボードで高度な処理を行うことが可能である。6G NTN では、高速大容量を実現する物理信号処理に加えて、後に述べるように、モビリティサポートのために必要となる処理も再生型衛星であれば比較的实现が容易と考えられる。

LEO 衛星は、多数の衛星が必要となる。別の見方をすれば、地上から多数の衛星が通信対象となりうるため、MIMO (Multiple-in Multiple-Out) を適用し、マルチビームを生成して多数のセルをサービスすることも可能である [4]。一方、LEO 衛星は地面に対して 7.6 km/s の速度で移動するため、ドップラーシフトの影響を無視することはできない。また、数分ごとに LEO 衛星を切り替える必要がある。

HAP は通常 20~50 km の高さに配備される。使用される機材としては、飛行船や航空機が想定されている。HAP は、カバーエリアが小さい。複数の HAP をマルチホップすることにより、カバーエリアを大きくすることも可能ではあるが、局所的なサービスに利用されることが多い。また、NTN においては、UE と LEO の間のゲートウェイの役割を果たしうる。また、HAP は、LEO セル間を結合するベントパイプを提供する可能性もある。

LEO 衛星と UE との直接通信^{*1} を考えた場合、LEO 衛星は常に移動しているため、UE はドメインを頻繁に変更することとなる。従って、モビリティをサポートするための制御、MIP、DDNS 等の処理が必要となる。これらの処理の一部をゲートウェイの HAP で実行すれば、システムの効率が向上する可能性がある。

UAV は高度 100~1000m であり、衛星や HAP に比較して低い遅延で大容量のリンクを提供できる可能性がある。また、UE に比べれば、高いモビリティ自由度を持つ。一方で、浮遊力のためのエネルギー供給方法、人間の生活空間における安全性の確保、天候の影響、継続的なサービス提供可能性等の課題がある。

いくつかの企業が、NTN 構築を開始している。SpaceX は、2015 年 1 月に 12000 個の LEO 衛星を打ち上げる Starlink プロジェクトを発表した。その後、2019 年 10 月 15 日に衛星数を 42,000 に増やしている [5]。実際、2021 年 3 月 24 日に Falcon 9 Block 5 ロケットを用いて 60 個のマイク

^{*1} UE がスマートフォンのような小型可搬端末の場合、特にアップリンクは技術的課題が多いと予想される。しかしながら、3GPP [1] には、直接通信が可能であることを前提とした記述がある。

ロ衛星を打ち上げている [6]。2021 年 5 月 4 日時点では、1565 個の衛星が打ち上げられている [7]。Amazon は、2019 年 4 月に約 10000 個の LEO 衛星による Kuiper 計画を発表し、2020 年 7 月 30 日に FCC から許可を得て、約 3000 個の打ち上げを計画している [8]。

HAP に関しては、ESA SPACE SOLUTIONS は、2019 年 2 月 15 日に HAPS4ESA プロジェクトを発表した。このプロジェクトでは、HAP と衛星を組み合わせたサービスの提供を目指している [9]。HAPS Mobile Inc は、2017 年 12 月 21 日にコアネットワークの構築とソーラー HAP に注目した HAPS MOBILE プロジェクトを発表した [10]。これらに対し Google は、loon プロジェクトを 2013 年に開始したが、2020 年に終了している [11] [12]。

以上の背景から、今後近いうちに、LEO や HAP を用いた NTN が実現すると考えられる。本稿では、LEO と HAP を考察対象とする。

3. LEO NTN 容量の評価と分析

3.1 関連研究

[2] は、将来の衛星通信全体の見通しを示している。特に、物理層からネットワーク層の問題と、これらの問題を解決することが期待される技術として、Beamhopping, Hierarchical Aerial Networks, Software-defined Radio が提示されている。[13] は、LEO 衛星のカバレッジエリアを検討し、高度とカバレッジの関係を示している。本稿の第 3 節以降の幾何学的定式化はこの論文の成果を用いている。[14] は、ドップラーシフトを考慮し、satellite to satellite, ground to satellite, satellite to ground, ground to ground, 4 つの論理リンクの構成を考察している。[15] は、従来の pure Aloha などのメディアアクセス方式を評価し、NTN に適した方式として、contention resolution diversity slotted ALOHA (CRDSA) を提案している。[16] では、Amazon の Kuiper の場合の LEO 衛星の容量を検討している。ただし、使用する衛星とビームの数が少ないため、現時点では修正する必要がある。[4] では、大容量伝送を検討するシミュレーション手法が提案されている。特に、ドップラーシフトとアドレスの切り替えに関して検討がなされている。[17] は、SpaceX のスターリンクプロジェクトに関して詳細に述べている。例えば、衛星セルとビームフットプリントの関係を定義している。

3.2 評価方法

LEO 衛星は 300~1000 km の低高度に配備されるため、LEO 衛星のカバレッジは GEO 衛星や MEO 衛星に比べて非常に小さくなる。カバレッジと同様に、LEO 衛星のセルサイズやサービスエリアも GEO 衛星や MEO 衛星に比べて非常に小さくなる。

図 2 に衛星と地球の幾何学的関係を示す。各衛星は高度

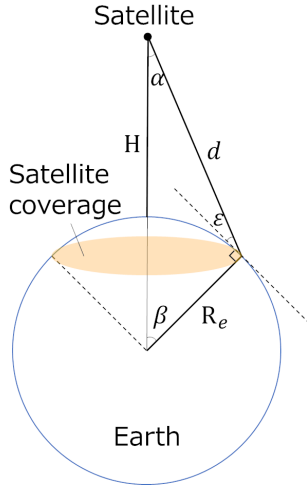


図 2: 衛星と地球の幾何学的関係

H (衛星と地球の間の距離) に配置される. UE の仰角 ϵ は, UE が衛星にアクセス可能な最小角度を表す. 図 2 中の黄色の楕円は衛星にアクセス可能な UE の領域である衛星のカバレッジを表す. α は衛星側の衛星カバレッジの角度である天底角度である. β は, 地球の中心側の被覆角である中心角である. 衛星と最も遠い UE との間の距離は d で示す. また, R_e は地球の半径である.

変数間の関係は, 次式のとおりとなる [13].

$$\epsilon + \alpha + \beta = \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

$$d \cos \epsilon = (H + R_e) \sin \beta \quad (2)$$

$$d \sin \alpha = R_e \sin \beta \quad (3)$$

式 (2) と式 (3) より, ϵ と α は次の関係にある.

$$\frac{\cos \epsilon}{\sin \alpha} = \frac{H + R_e}{R_e} \quad (4)$$

このとき, R_e は定数であるため, ϵ と H が与えられた場合, β は次の式で得られる [16].

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \epsilon - \arcsin \left(\frac{R_e}{R_e + H} \cos \epsilon \right) \quad (5)$$

衛星のカバレッジを地球の球面であると考え, 球面座標を使用すると, 以下の二重積分でカバレッジエリアを取得できる.

$$S = \int_0^{2\pi} \int_0^\beta R_e^2 \sin \phi d\phi d\theta \quad (6)$$

ここで, ϕ は頂角, θ は水平角である. 式 6 は次のように計算できる.

$$S = 2\pi R_e^2 (1 - \cos \beta) \quad (7)$$

各 LEO 衛星が同じスペクトルを使用して地球上の固定セルにサービスを提供すると仮定する. 適切なセルサイ

ズを計算するには, ビームフットプリントを得る必要がある. ここで重要なパラメータは, HPBW (Half Power Beam Width) である. HPBW は, ビームパワーの最大値から -3 dB となる 2 点間のビーム角度幅と定義される. HPBW の半分, すなわち $HPBW/2$ は, 衛星での角度 α として見ることができる. (1), (4), (7) を使用すると, ビームフットプリント面積は次のように計算できる.

$$S_b = 2\pi R_e^2 (1 - \cos \beta_b) \quad (8)$$

ここで, β_b は次の式で得られる.

$$\beta_b = \frac{\pi}{2} - \frac{HPBW}{2} - \arccos \left(\frac{R_e + H}{R_e} \sin \frac{HPBW}{2} \right) \quad (9)$$

セルは, 3dB のビームフットプリント内の六角形であると定義する. 次に, 六角形とその外接円の関係からセルサイズを得ることができる.

$$S_c = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} S_b \quad (10)$$

1 つの衛星が MIMO を使用して多数のビームを生成できると考えると, 衛星のサービスエリアは次のように計算できる.

$$S_s = n S_c \quad (11)$$

ここで, n は衛星が生成するビームの数である. 一般に, 衛星サービスエリアは衛星カバレッジエリアより小さいである. したがって, UE が特定の緯度 λ の位置からアクセスできる衛星の数は次のように計算できる [16].

$$N_{\text{visible}} = \frac{N_{\text{sat}}}{\pi^2 \sin a} \int_p^q \sqrt{\frac{\beta^2 - (x - \lambda)^2}{1 - \left(\frac{\sin x}{\sin a}\right)^2}} dx \quad (12)$$

ここで, N_{sat} はすべての衛星の数である. a は軌道傾斜角である. $p = \max(-a, \lambda - \beta)$; $q = \min(a, \lambda + \beta)$.

次に, 衛星のサービングレシオは次の式で与えられる.

$$\rho = \frac{N_{\text{visible}} S_s}{S} \quad (13)$$

サービングレシオは通常 $\rho \in (0, 1)$ とする. (11) が示すように, サービングエリア S_s の値はビーム数 n の影響を受ける. 3GPP によると, ビームの数は 19 を超える可能性がある [1]. 周波数再利用係数 (Frequency Reuse Factor, FRF) が 1 の場合, 各ビームは周波数帯域全体を使用し, ビーム数は 61 である. FRF が 3 の場合, 各ビームは 3 分の 1 の周波数帯域を使用し, ビーム数は 127 になる可能性がある. FRF は 3 のとき, ビームカバレッジは FRF 1 の状況に比べて約 2 倍であるが, 各ビームの帯域幅のために全体の容量は小さくなる. 以降では, 必要に応じてビーム番号を 61 として使用する.

そして, 1 つの LEO 衛星ビームの容量は次のように書

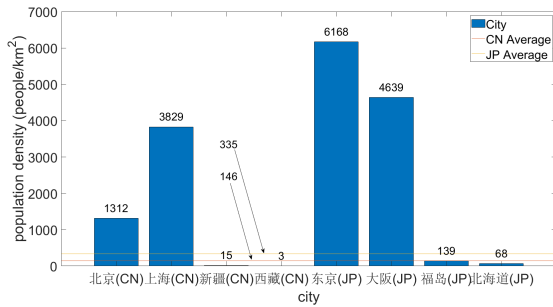


図 3: 検討対象地域の人口密度

表 1: NTN で要求される通信容量

| City | Capacity Needed (Mbps/km²) |
|----------------|----------------------------|
| Beijing (CN) | 131.2 |
| Shanghai (CN) | 382.9 |
| Xinjiang (CN) | 1.5 |
| Xizang (CN) | 0.3 |
| CN Average | 14.6 |
| Tokyo (JP) | 616.8 |
| Osaka (JP) | 463.9 |
| Fukushima (JP) | 13.9 |
| Hokkaido (JP) | 6.8 |
| JP Average | 33.5 |

くことができる。

$$C_{\text{beam}} = \eta B \quad (14)$$

ここで、 η はスペクトル効率、 B は帯域幅である。サービングレシオを考慮すると、セルあたりの実際の容量は次のようになる。

$$C_{\text{cell}} = \rho C_{\text{beam}} \quad (15)$$

以上より、単位面積あたりの容量は次の方法で計算できる。

$$C = \frac{C_{\text{cell}}}{S_c} \quad (16)$$

3.3 要求される通信容量の検討

ここでは、図 3 に示す中国と日本の人口密度から要求される通信容量を検討する。

全人口の 1% が同時に NTN を使用し、全員が 10 Mbps を必要としていると仮定する。つまり、全員が 1 日あたり最大 1080 MB のトラフィックを持っているとすると、NTN に要求される通信容量は、表 1 のように求められる。

次に、海上における通信要求についても検討した。自動識別システム (AIS) の船舶追跡サイト [18] から、海上交通に関する衛星追跡データを得ることができる。図 4 は、2020/8/20 の南シナ海のデータであり、280836 隻の船舶が存在していたことが分かる。南シナ海の面積は 350 万平

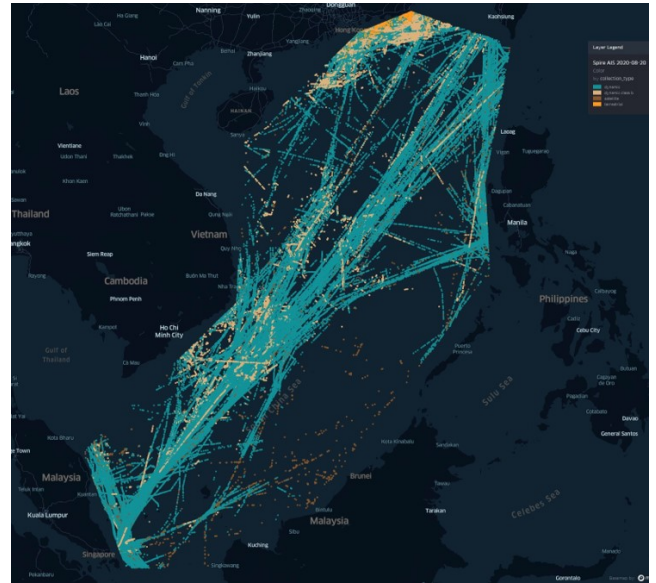


図 4: 南シナ海における 2020/8/20 の AIS 追跡 [18]

表 2: 南シナ海上で要求される通信容量

| Assumption (people/ship) | Population Density (people/km²) | Capacity Needed (Mbps/km²) |
|--------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| 20 | 1.6 | 0.16 |
| 30 | 2.4 | 0.24 |
| 40 | 3.2 | 0.32 |

方キロメートルである。各船舶上で通信を要求する人口が 20/30/40 であると仮定すると、要求される通信容量は表 2 となる。

3.4 通信容量の分析

ここでは、10,000 個の衛星が高度 550 km で 50° の傾斜角を持つ多数の軌道に配備されていると仮定する。[17] によれば、仰角 β は 35° と想定されている。3.1 で述べたように、各衛星は 61 のビームを生成する。ここでは、ビーム毎の偏波数は 2 と仮定する。すなわち、122 本のビームを生成するのと同等であることを意味する。3GPP [1] の資料から、LEO 衛星は S バンドまたは Ka バンドで通信できる。S バンドの場合、ダウンリンクとアップリンクの両方が 2 GHz を使用する。最大チャネル帯域幅は 30 MHz、HPBW は 4.4° である。また、Ka バンドの場合は、ダウンリンクは 20 GHz、アップリンクは 30 GHz を使用する。最大チャネル帯域幅は 1 GHz、HPBW は 1.76° である。地球半径は 6378 km と仮定する。

以上の設定でによれば、衛星のカバーエリアは約 1.4×10^6 km² である。また、セルサイズは S バンドで 1160 km²、Ka バンドで 185 km² である。一方、サービスエリアは S バンドで 141520 km²、Ka バンドで 22570 km² となる。

3.1 の (12) によれば、緯度 λ のある位置から見える衛星

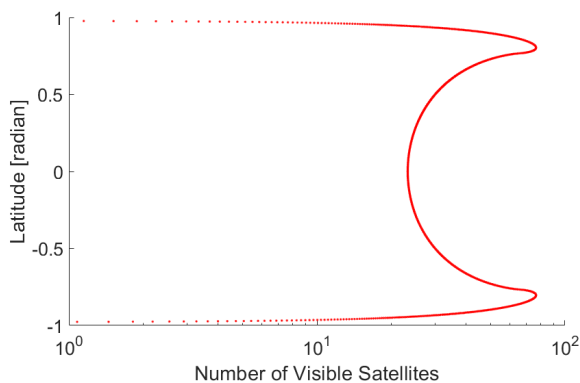


図 5: 可視衛星の数

の数は、図 5 に示すことができる。同図では、57°N または 57°S を超えると、サービスできる衛星が少なくなる。また、57°N から 57°S の間では、可視衛星の数は 24 から 76 である。これは、衛星カバレッジエリア全体を S バンドで提供でき、エリアの 36%~100% を Ka バンドで提供できることを意味する。

[16] によれば、LEO 衛星のスペクトル効率率は 0.5 bps/Hz である。したがって、単一の LEO 衛星ビームの容量は S バンドで 15 Mbps, Ka バンドで 500 Mbps である。実際のサービスエリアを考慮すると、1 セルの容量は S バンドで 15 Mbps, Ka バンドで 180~500 Mbps である。これは、S バンドで 0.013 Mbps/km², Ka バンドで 1~2.7 Mbps/km² である。

以上の分析からいくつかの結論が得られる。まず、S バンドで動作する LEO 衛星は、0.13 人/km² の人口密度のエリアにサービスを提供できることとなる。これは、ほとんどの地域で通信要件を満たせないことを意味する。Ka バンドの LEO NTN は、10~27 人/km² の人口密度のエリアにサービスを提供できる、Xinjiang(CN), Xizang(CN), 南シナ海、三つのところで要求される通信容量を勘案すると、Ka バンドの LEO 衛星は、一部の農村地域または海上でのサービスに利用できると考えられる。

以上より、S バンドの LEO NTN は 0.13 人/km² のエリアに、Ka バンドの LEO NTN は 10~27 人/km² のエリアにサービスを提供できる。これは言い換えると、LEO NTN は、人口密度の低い地上あるいは海上の地域で運用可能であるが、LEO だけで 6G 通信を提供することは困難である。従って、例えば HAP や UAV を併用することが一つの解法である。

高度 20km で配備された HAP の場合、各 HAP が 185 km² のセルをカバーする。この場合、ユーザーの仰角は約 70° である。また、[13] によると、HAP のスペクトル効率は Ka バンドで 6 bps/Hz になる。これが実際に達成できれば、NTN にかんがりの容量が提供される。

4. NTN アプリケーションに関する考察

4.1 アプリケーション例

NTN を活用したアプリケーションとしては、リアルタイムパフォーマンス、テレプレゼンス、リモートアンサンブル、遠隔医療、リモートコントロール、グローバル IoT を必要とするオンラインゲームなどが考えられている。本稿では、マルチメディア通信、土砂災害センシング、海洋上通信の観点から考察する。

4.2 マルチメディア通信のための NTN

撮影機器の小型化、低価格化にともなって高精細・多次元の映像情報を利活用した Virtual Reality (VR), Augmented Reality (AR), Multimedia Internet of Things (MIoT) [19] などのサービスに対する需要が高まりつつある。このようなサービスを通して所望のユーザに低遅延かつ高品質に映像情報を提供するための映像収集手法・映像配信手法が提案されている。

映像情報を利活用するシステムは主に撮影部・配信部・表示部から構成される。撮影部は撮影機器で撮影した映像情報を有線あるいは無線を通じて配信部に送信する。配信部では収集した映像情報を適宜処理するとともに、表示部のユーザに対して有線あるいは無線を通して映像情報を配信する。表示部は配信部から受信した映像を元にしてユーザが所望する映像を生成するとともに有線あるいは無線を通じてディスプレイに表示する。

撮影部においては、360 度カメラ・LiDAR カメラあるいは複数のカメラを有線で相互接続して得られた映像情報を有線伝送する方法 [20], あるいは無線を通して複数のカメラから映像を伝送する方法 [21, 22] が提案されている。配信部においては、有線通信路あるいは無線通信路の状況に応じて 2 次元映像を配信する手法が広く提案 [23] されている。また、近年では 2 次元映像情報から 3 次元映像情報であるポリリメトリック映像 (点群映像やメッシュ映像) を生成する [24] とともに 3 次元映像情報のまま有線通信路あるいは無線通信路を介して配信する手法 [25, 26] が提案されている。表示部においては、映像情報の高解像度化・高次元化が進むにつれて映像情報のうち、その一部のみを有線伝送あるいは無線伝送する手法 [27] が提案されている。また、ゲーム画面などで利用される Computer Graphics (CG) 映像をワイヤレスディスプレイに無線伝送する手法 [28] も提案されている。

本節では、撮影部・配信部・表示部に対して NTN を導入することを考える。NTN を導入することで、撮影部においては広域から情報を収集できること、配信部および表示部においては広域に対する同時配信ができること、伝搬遅延削減による映像伝送の低遅延化が期待できる。それぞ

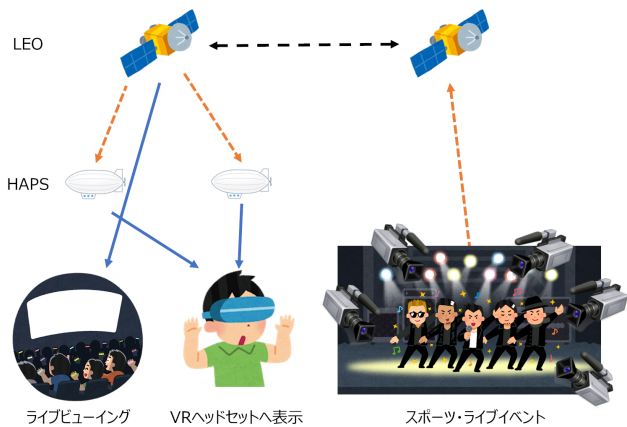


図 6: NTN を活用した大多数ユーザーに対するボリュームメトリック配信

れの優位性から、映像情報を利活用するシステムにおいては次の効果が期待できる。

- (1) 大多数ユーザーに対する映像情報の同時配信
- (2) 従来の有線通信・無線通信が利用困難な地点における映像情報の収集および配信
- (3) 緊急性の高い映像情報の低遅延収集および配信

大多数ユーザーに対する映像情報の同時配信としては、VRヘッドセットやARディスプレイを保持するユーザーを対象としたボリュームメトリック映像の同時配信が挙げられる。ボリュームメトリック映像の同時配信はエンターテインメント分野におけるVRコンテンツ・ARコンテンツのライブビューイングや、教育分野における地域や国をまたいだ同時講義などにつながると考えられる。図6に、NTNを活用した大多数ユーザーに対するボリュームメトリック映像の同時配信の一例を示す。まず、撮影部から収集したボリュームメトリック映像あるいは収集した2次元映像情報を元にして生成したボリュームメトリック映像を配信部のサーバが取得する。サーバは3次元情報を保ったまま圧縮するとともに、所望するユーザーの地点に応じてHAPSあるいはLEOを用いてボリュームメトリック映像をマルチキャスト配信する。ユーザーはボリュームメトリック映像を受信すると、ユーザーが所望する角度の映像情報をボリュームメトリック映像からレンダリングして自身のVRヘッドセットやARディスプレイ上に表示する。

従来の有線通信・無線通信が利用困難な地点における映像情報の収集および配信としては、海中や山間部、砂漠で得られた映像情報の収集などが挙げられる。例えば、海中で得られた高精細映像やボリュームメトリック映像を収集することでエンターテインメント分野における水中VR体験や、海底資源の探査や養殖場管理などにつながると考えられる。また、山間部や砂漠に設置した定点カメラ映像を収集することで遭難者の早期発見が可能になると考えられる。図7に、NTNを活用した水中の映像情報を収集する一例を示

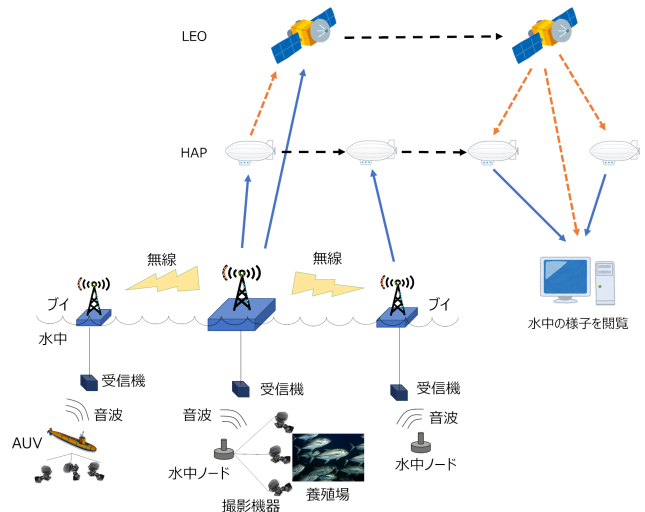


図 7: NTN を活用した水中からの映像収集

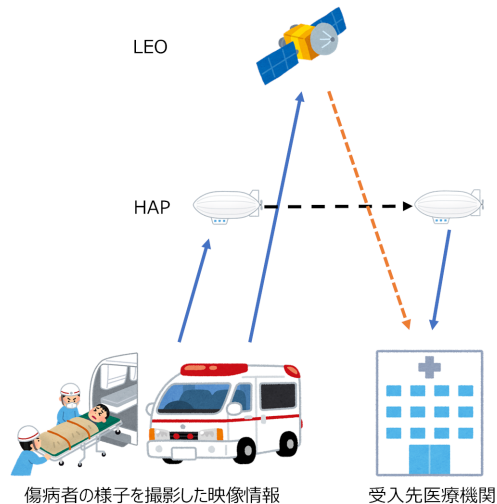


図 8: NTN を活用した救急自動車からの低遅延映像収集

す。撮影部は、水中を走行する Autonomous Underwater Vehicle (AUV) が具備する撮影機器あるいは定点に設置された撮影機器から得られた映像情報を音波あるいは光無線を用いて海上のPIや船舶に送信する。水中から得られた映像情報はHAPやLEOを介して船舶などから地上のユーザーあるいは中央局に対してユニキャスト伝送あるいはマルチキャスト伝送される。映像情報を受信した表示部はそのまま映像をディスプレイに表示する、あるいは、得られた映像情報に対して画像認識技術を用いることで映像情報から所望の情報を抽出することができる。

緊急性の高い映像情報の低遅延収集および配信としては、救急処置時・救急搬送時や自然災害時における映像情報の収集および配信などが挙げられる。例えば、救急搬送中の患者の様子を撮影した映像情報を受入先医療機関に対して低遅延伝送することで、医師の指示による適切な処置あるいは医療機関への円滑な引き継ぎが可能になると考えられる。また、自然災害発生時には定点カメラの映

像を低遅延に収集することで、迅速な避難指示が可能になると考えられる。図 8 に、一例として NTN を活用した救急自動車からの映像収集を示す。救急自動車に搭載された撮影機器は傷病者の様子や処置の様子を撮影した映像情報を取得する。得られた映像情報は救急自動車が具備するアンテナを用いて HAP あるいは LEO を介して受入先医療機関に対して直接伝送する。救急自動車とやり取りする医師は受信した映像情報を自身が保持する端末上に表示するとともに、遠隔から傷病者の様子に応じた適切な処置を指示すること、あるいは、受入に向けた準備が可能になると考えられる。

マルチメディア通信のための NTN では、ユーザに対して低遅延かつ高品質な映像情報を伝送するために、HAP や LEO における無線リソース制御や誤り訂正制御、経路制御手法が重要となる。例えば、映像情報の伝送においては伝送中に発生する誤りや損失が映像品質の著しい劣化を及ぼすことが分かっている。映像情報の特性、伝送路特性を考慮した不均一誤り訂正制御を設計することで映像伝送の高品質化につながると考えられる。

4.3 土砂災害センシングのための NTN

日本では各地で豪雨や長期的な降雨に伴った土砂災害が発生している [29–31]。土砂災害被害軽減のための土砂災害の前兆現象検知を目的として、加速度センサ [32,33] やカメラ [34] による土砂災害前兆現象検知センシングシステムが提案されている。山間地域では、有線通信網を構築することは困難であることから、センシングした情報を無線通信によって収集する必要がある。しかしながら、山間地域は既存の携帯電話網のサービスエリアとなっていないことが多い。さらに山間部では峠などの遮蔽によって地上間の安定的な無線通信を実現することは難しい [35]。そこで、上空の衛星を用いた NTN を活用する土砂災害前兆検知センシング情報収集の実現を検討する。

土砂災害前兆現象検知センシングでは、2つの状況に対応する必要がある。1つめは土砂災害の危険性がない通常時、2つめは土砂災害の危険性が高まっている土砂災害危険時である。それぞれの状況に応じて、センシングシステムに求められる役割が異なる。通常時には、土砂災害前兆現象検知センシングシステムで取得した情報を土砂災害現象解析サーバに収集して、通常時の山間地域のセンサの値・画像について解析を行う。土砂災害の危険性が近づいている前兆現象を解析によって捉えられるようにする。一方、土砂災害危険時には、通常時の動作に加えて、土砂災害の危険性の高い地域に住む住民に対して迅速に情報を提供する必要があり。

図 9 に、通常時の NTN の動作を示す。山に設置されたセンサから HAP や LEO に対して、センシングした情報を送信する。受信した HAP と LEO は受信したセンシ

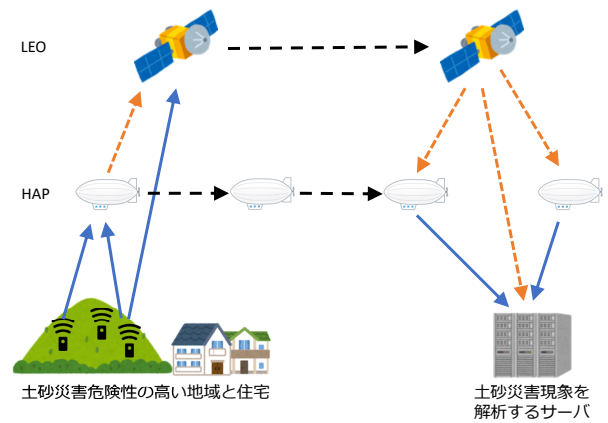


図 9: 通常時: 土砂災害前兆現象検知のための NTN

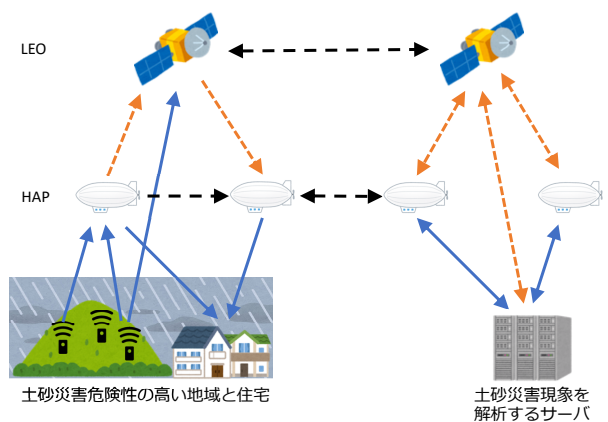


図 10: 土砂災害危険時: 土砂災害前兆現象検知のための NTN

グ情報をサーバにリレーして伝送する。センサ端末の送信電力は小さいことから、高度の低い HAP の役割が重要となる。また、このときセンサ情報は迅速に収集される必要はなく、許容できる遅延は大きい。一方でサーバ付近は全国から集められた情報が集中することで輻輳が発生すると考えられる。センサ情報の許容できる遅延に応じた経路制御手法の検討する必要がある。

土砂災害危険時の NTN の動作を、図 10 に示す。土砂災害危険時には、被害を受ける可能性のある地域住民に対して、山に設置したセンサからの情報を迅速に伝達する必要がある。そこで山に設置されたセンサから HAP に送られた情報は、迅速に地域の住宅等に対して転送される。また、土砂災害の前兆現象検知の制度を向上するためには、土砂災害現象解析サーバへの土砂災害時のセンサ情報の収集することが必要である。さらに、サーバで解析したことで検知できた土砂災害の前兆を、迅速に地域住民に伝達する。この様に、通常時と異なり、土砂災害危険時には地域住民に迅速に土砂災害の危険性を伝えるための情報伝送が必要となる。

土砂災害前兆現象検知センシングのための NTN では、

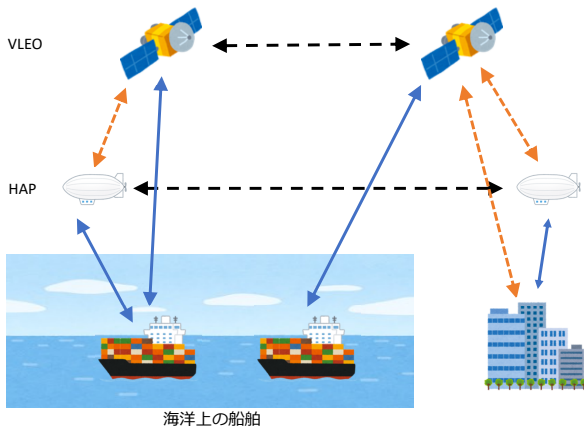


図 11: VLEO と HAP による海洋上通信

通常時および土砂災害危険時ともに土砂災害の危険性の高い現場に近い HAP の役割が重要であると考えられる。HAP を中心として、通常時と土砂災害危険時によって異なる、宛先、経路および許容遅延に応じた動作可能な NTN を設計する必要がある。このとき、土砂災害の危険時には雨が降り続けているため、センサと HAP との間の雨天時の電波伝搬の特性も考慮する必要があると考えられる。

4.4 海洋上通信のための NTN

自動運航船の実用化に向けた実証実験が各国で行われていて、我が国では実用化に向けて国土交通省等が実証事業を進めている [36]。自動運航船の機能でも特に遠隔操船機能を実現するためには、海洋上の通信を実現する必要がある。現在、海洋上向けの衛星通信の商業サービスとして Marlink 社の SEALINK PREMIUM [37]、66 台の高度約 800 km の LEO 衛星で構成された Iridium 社の OpenPort [38] などがある。しかしながら、既存の衛星通信サービスでは、衛星の高度が高いため 1 台の衛星のサービスエリアに存在する船の台数が増えて、遠隔操船機能を実現に必要な通信容量を有していない。

また、海洋上の船舶の地位情報を把握するための手法として、AIS (船舶自動識別装置: Automatic Identification System) がある。AIS とは、一定以上の大きさの船舶に設置が義務づけられている、船舶の識別、位置、進路、速度などを自動的に VHF 帯電波で送受信するシステムである [39]。現在でも、VHF 帯電波の伝搬する範囲内の船舶同士と陸上施設では受信した船舶の位置情報等を把握している。海洋上の AIS を受信するために、LEO 衛星を用いて AIS 信号を受信する衛星 AIS が運用されている [40–42]。しかしながら、大量の船舶からの信号を受信してしまうことから輻輳が発生することが問題となっている [41, 42]。例えば、東シナ海から南シナ海にかけての大量の船舶が行き来する海域では、輻輳に伴って衛星 AIS の補足率が低い [41]。

そこで、LEO の中でも高度の低い VLEO (Very Low Earth Orbit) と HAP による海洋上通信と AIS の実現を検討する。VLEO の高度は約 300 km から約 700 km と高度が低いことから、海洋上通信の大容量化の実現および AIS の輻輳の問題の解決が期待される。図 11 に、VLEO と HAP による海洋上通信の一例を示す。VLEO と HAP が協調して船舶間や船舶と陸上間の通信を実現している。海洋上では HAP を大量に飛行させることは困難であることから、地上に比べて HAP の台数が少なくなると考えられる。このことから、海洋上では地上とは異なり、VLEO の役割が重要となる。

船舶が多く行き来する海域では、大容量かつ低遅延な海洋上通信を実現しなければ、船舶の海難事故等のリスクが高まる。船舶の密度に応じて、海洋上通信のアプリケーションを考慮した容量・遅延を保証するメディアアクセス制御や VLEO リソース割当について今後検討する必要があると考えられる。

5. おわりに

本稿では、NTN の基礎的な背景について述べ、LEO 衛星を用いた NTN の通信路容量を実際の人口密度に基づいて検討した。また、NTN を活用したアプリケーションについても述べた。

LEO NTN に関しては、S バンドの LEO NTN は 0.13 人/km² のエリアに、Ka バンドの LEO NTN は 10~27 人/km² のエリアにサービスを提供できることが分かった。つまり、LEO NTN は、人口密度の低い地上あるいは海上の地域で運用可能であるが、LEO だけで 6G 通信を提供することは困難であり、HAP や UAV を併用することが一つの解法である。

また、NTN を活用したアプリケーションとしてマルチメディア通信、土砂災害センシング、海洋上通信を取り上げた。マルチメディア通信においては誤りや損失に起因する映像品質の低下を抑制するために、HAP や LEO における映像情報の特性および伝送路特性を考慮した誤り訂正制御が重要となる。一方で、土砂災害の発生は局所的であるため、土砂災害センシングにおいては HAP の役割が重要となる。HAP と地上との通信における雨のまた、海洋上通信においては、海洋上に HAP を展開することは困難であるため、VLEO を中心としたネットワークを構築する必要がある。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP19H01101, JP20K19783 の支援の下で行った。

参考文献

- [1] 3GPP: Solutions for NR to Support Non-terrestrial Networks (Release 16), <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38series/38.821/38821-g00> (2020).
- [2] Kodheli, O., Lagunas, E., Maturro, N., Sharma, S. K., Shankar, B., Montoya, J. F. M., Duncan, J. C. M., Spano, D., Chatzinotas, S., Kisseleff, S., Querol, J., Lei, L., Vu, T. X. and Goussetis, G.: Satellite Communications in the New Space Era: A Survey and Future Challenges, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, Vol. 23, No. 1, pp. 70–109 (online), DOI: 10.1109/COMST.2020.3028247 (2021).
- [3] 渡辺 尚, 藤橋卓也: 階層化セルレス NTN に関する予備検討, 第 68 回応用物理学学会春季学術講演会予稿集 16p-Z16-5 (2021).
- [4] Goto, D., Shibayama, H., Yamashita, F. and Yamazato, T.: LEO-MIMO Satellite Systems for High Capacity Transmission, *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1–6 (online), DOI: 10.1109/GLOCOM.2018.8647694 (2018).
- [5] SPACENEWS: SpaceX submits paperwork for 30,000 more Starlink satellites (2019).
- [6] Spaceflight Now: SpaceX launches 25th mission for Starlink internet network, , available from (<https://spaceflightnow.com/2021/03/24/spacex-launches-25th-mission-to-build-out-starlink-internet-network/>) (accessed 2021/03/24).
- [7] Spaceflight Now: Launch Schedule, , available from (<https://spaceflightnow.com/launch-schedule/>) (accessed 2021/05/09).
- [8] GeekWire: Amazon vows to invest 10B in Kuiper satellites after getting FCC’s go-ahead, , 入手先 (<https://www.geekwire.com/2020/fcc-says-amazon-can-proceed-kuiper-satellites-will-accommodate-rivals/>) (参照 2020/07/30).
- [9] ESA Space Solutions: HAPS4ESA - Services enabled by High Altitude Pseudo Satellites (HAPS) complemented by satellites, , available from (<https://business.esa.int/projects/haps4esa>) (accessed 2019/02/15).
- [10] HAPS MOBILE: Established HAPSMobile Inc. on December 21, , available from (<https://www.hapsmobile.com/en/history/>) (accessed 2017/12).
- [11] WIRED: Alphabet Pops Loon’s Balloons—but Won’t Call It a Failure (邦題 グーグルが追いかけた“気球インターネット”の夢は終われど、それは決して「失敗」とは呼ばれない), , 入手先 (<https://www.wired.com/story/plaintext-alphabet-pops-loons-balloons/>) (参照 2021/5).
- [12] Bellemare, M.G. Candido, S., Castro, P. and et al.: Autonomous navigation of stratospheric balloons using reinforcement learning, *Nature*, No. 588, pp. 77–82 (online), DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2939-8> (2020).
- [13] Cakaj, S., Kamo, B., Lala, A. and Rakipi, A.: The Coverage Analysis for Low Earth Orbiting Satellites at Low Elevation, *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, Vol. 5, No. 6, pp. 6–10 (online), DOI: 10.14569/IJACSA.2014.050602 (2014).
- [14] Leyva-Mayorga, I., Soret, B., Röper, M., Wübben, D., Matthiesen, B., Dekorsy, A. and Popovski, P.: LEO Small-Satellite Constellations for 5G and Beyond-5G Communications, *IEEE Access*, Vol. August, pp. 184955–184964 (online), DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3029620 (2020).
- [15] Mengali, A., De Gaudenzi, R. and Stefanović, c.: On the Modeling and Performance Assessment of Random Access With SIC, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 36, No. 2, pp. 292–303 (online), DOI: 10.1109/JSAC.2018.2804175 (2018).
- [16] Sedin, J., Feltrin, L. and Lin, X.: Throughput and Capacity Evaluation of 5G New Radio Non-Terrestrial Networks with LEO Satellites, *GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference*, pp. 1–6 (online), DOI: 10.1109/GLOBECOM42002.2020.9347998 (2020).
- [17] SpaceX: SPACEX V-BAND NON-GEOSTATIONARY SATELLITE SYSTEM ATTACHEMENT A TECHNICAL INFORMATION TO SUPPLEMENT SCHEDULES, https://licensing.fcc.gov/myibfs/download.do?attachment_key=1190019.
- [18] Maritime, S.: South China Sea 24-hour Sample including Dynamic AIS™, <https://spire.com/maritime/>.
- [19] Nauman, A., Qadri, Y. A., Amjad, M., Zikria, Y. B., Afzal, M. K. and Kim, S. W.: Multimedia Internet of Things: A Comprehensive Survey, *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 8202–8250 (2020).
- [20] 横井孝紀, 福嶋慶繁, 圓道知博, パナヒブル テヘラニメヒルダド, 藤井俊彰, 谷本正幸: 移動カメラレーを用いた時空間の自由視点画像生成, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J94-D, No. 12, pp. 1996–1999 (2011).
- [21] Wang, P., Dai, R. and F.Akyildiz, I.: A Differential Coding-Based Scheduling Framework for Wireless Multimedia Sensor Networks, *IEEE Transactions on Multimedia*, Vol. 15, No. 1, pp. 684–697 (2013).
- [22] Nu, T. T., Fujihashi, T. and Watanabe, T.: A Traffic Reduction Method for Crowdsourced Multi-View Video Uploading, *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 36544–36556 (2018).
- [23] Fujihashi, T., Koike-Akino, T., Watanabe, T. and Orlik, P.: FreeCast: Graceful Free-Viewpoint Video Delivery, *IEEE Transactions on Multimedia*, Vol. 21, No. 4, pp. 1000–1010 (2019).
- [24] Wang, N., Zhang, Y., Li, Z., Fu, Y., Liu, W. and Jiang, Y.-G.: Pixel2Mesh: Generating 3D Mesh Models from Single RGB Images, *European Conference on Computer Vision*, pp. 55–71 (2018).
- [25] Fujihashi, T., Koike-Akino, T., Watanabe, T. and Orlik, P.: HoloCast+: Hybrid Digital-Analog Transmission for Graceful Point Cloud Delivery with Graph Fourier Transform, *IEEE Transactions on Multimedia*, Vol. PP, No. 99, pp. 1–13 (2021).
- [26] Han, B., Liu, Y. and Qian, F.: ViVo: Visibility-Aware Mobile Volumetric Video Streaming, *Proceedings of the 26th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking* (2020).
- [27] Yujun, L., Fujihashi, T., Saruwatari, S. and Watanabe, T.: 360Cast+: Viewport Adaptive Soft Delivery for 360-Degree Videos, *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 52684–52697 (2021).
- [28] Kuang, W., Chan, Y. L., Tsang, S. H. and Siu, W. C.: DeepSCC: Deep Learning-Based Fast Prediction Network for Screen Content Coding, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 30, No. 7, pp. 1917–1932 (2020).
- [29] 檀上 徹: 降雨に伴う土砂災害発生メカニズムとその予測手法, *安全工学*, Vol. 56, No. 6, pp. 463–469 (2017).
- [30] 鈴木雅一, 小橋澄治: がけ崩れ発生と降雨の関係について, *砂防学会誌*, Vol. 34, No. 2, pp. 16–26 (1981).
- [31] 社団法人地盤工学会: 豪雨時における危険度予測, 豪雨時における斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予測, 丸

- 善出版株式会社, chapter 7 (2009).
- [32] 出原 聡, 小林 真, 新 浩一, 西 正博: 土砂災害前兆現象検知のための LPWA を用いたセンサシステムにおける送信スケジュール手法の一検討, 電子情報通信学会センサネットワークとモバイルインテリジェンス (SeMI) 研究会, Vol. 120, No. 382, pp. 41-46 (2020).
 - [33] 岩井将行, 今井大樹, 西谷 哲, 小林正典, 戸辺義人, 瀬崎 薫: iPacket:無線センサ杭を用いた地滑り計測, 情報処理学会モバイルコンピューティングとユビキタス通信 (MBL) 研究会, Vol. 52, No. 1, pp. 1-7 (2010).
 - [34] 西 正博, 古川達也, 新 浩一: 電源自立型の土砂災害監視カメラシステムの構築と評価, 情報処理学会論文誌, Vol. 58, No. 3, pp. 736-744 (2017).
 - [35] 白井拓也, 小林 真, 新 浩一, 西 正博: 土砂災害センシングネットワークのための山間地における 920MHz 帯電波伝搬特性の評価, 電子情報通信学会安全・安心な生活と ICT (ICTSSL) 研究会, Vol. 119, No. 401, pp. 115-120 (2020).
 - [36] 国道交通省海事局: 海事産業将来像検討会報告書, <https://www.mlit.go.jp/common/001344869.pdf> (2020).
 - [37] Marlink: Maritime VSAT Communications, <https://marlink.com/solutions/maritime-vsats/>.
 - [38] Iridium: Iridium Satellite Communication, <https://www.iridium.com>.
 - [39] 海上保安庁: 船舶自動識別装置 (AIS: Automatic Identification System), https://www.kaiho.mlit.go.jp/syokai/soshiki/toudai/ais/ais_index.htm.
 - [40] Orbcomm: Networks: Satellite AIS, <https://www.orbcomm.com/en/networks/satellite-ais>.
 - [41] 唐木 敦: 衛星 AIS について (特集 AIS データの利用と実際), 日本航海学会誌 NAVIGATION, Vol. 188, pp. 55-60 (2014).
 - [42] 神澤貴紀, 府川和彦, 平原大地: 衛星 AIS における衝突パケット数推定, 電子情報通信学会衛星通信 (SAT) 研究会, Vol. 116, No. 144, pp. 51-56 (2016).