

アストロメトリ法による系外惑星発見前夜



福井 暁彦

〈東京大学先進科学研究機構 〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1〉

e-mail: afukui@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

2020年代後半以降に公開予定のGaiaの時系列位置データを用いて、アストロメトリ法により全天で新たに数万個以上の系外惑星が発見されると見積もられている。それらの多くは軌道距離が数AU程度の巨大惑星であり、その正確な軌道や質量の分布が明らかとなることで、いまだ謎の多い巨大惑星の形成過程への理解が大きく進むと期待される。また、日本で現在開発が進められている、近赤外位置天文衛星JASMINEやすばる望遠鏡用の赤外広視野高解像観測装置ULTIMATE-Subaruを用いて、今後近赤外域でのアストロメトリ法系外惑星探索が可能となる。Gaiaと異なる波長帯を用いたユニークな研究が期待される。

1. はじめに

太陽系外惑星（以下、系外惑星）の探索は1990年代後半以降急速に進展し、惑星系の多様性が明らかとなった。一方、そのような多様な惑星系がどのようにして形成されたかという新たな謎も浮き彫りとなり、その謎の解明に向けて現在さまざまな理論的、観測的研究が世界で進められている。

これまでに発見された系外惑星の累積個数は2023年4月時点で5,300個に上るが、それらの大半は視線速度法、トランジット法、重力マイクロレンズ法、もしくは直接撮像法を用いて発見されている（図1参照）。一方、系外惑星の探索の歴史において、最も古くに用いられた手法は実は上記のいずれでもなく、アストロメトリ（astrometry）法と呼ばれる位置天文学を用いた手法である。同手法では、他の手法で得難い惑星の正確な軌道や質量を測ることが可能であるが、その観測の困難さから、今日までに同手法単独で発見された惑星はまだほんのわずかである。この状況が、2020年代後半以降に公開されるGaia衛星の時系列位

置データにより一変すると考えられている。同データにより、新たに数万個以上の系外惑星が発見されると見積もられており [2]、質と量ともに他の手法では得られない革新的なデータがもたらされると期待されている。本稿ではこのアストロメトリ法について、その特徴や歴史的な背景、およ

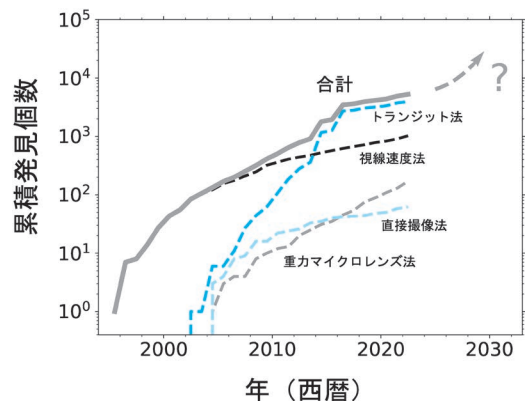


図1 系外惑星の累積発見個数の推移。波線は発見手法ごとの推移、実線はその合計数の推移を表す（データは [1] より取得）。今後、アストロメトリ法で新たに数万個以上の惑星の発見が期待されており、合計数が飛躍的に増加する可能性がある*1。

び期待されるサイエンスを概説する。

2. アストロメトリ法

2.1 原理と惑星シグナルの大きさ

アストロメトリ法は、惑星をもつ恒星が惑星系の質量重心のまわりを公転することに伴い、恒星の位置が天球面上で変動する効果を検出する手法である。恒星に惑星が付随する場合、恒星の時系列天球座標データから固有運動および年周視差の影響を差し引いた残差データにおいて、以下の振幅 α （＝惑星シグナルの大きさ）をもつ周期的な変動が観測される：

$$\alpha = \frac{M_p}{M_s} \frac{a}{d}. \quad (1)$$

ここで M_p と M_s はそれぞれ惑星と主星の質量、 a は惑星の軌道長半径、 d は惑星系までの距離を表す。例えば、 $M_s=1$ 太陽質量、 $M_p=1$ 木星質量（ $\approx 10^{-3}$ 太陽質量）、 $a=1$ au、 $d=10$ pcとした場合、 $\alpha \approx 0.1$ ミリ秒角となる。この振幅の大きさは地上の大型望遠鏡で達成可能な角度分解能より3桁も小さく、検出は容易ではないことが分かる。一方、超精密な位置天文観測を行うことを目的に設計されたGaia衛星では、明るい恒星（ $G < 14$ ）において一回の観測（スキャン）あたりに達成可能な位置決定精度が0.05 ミリ秒角以下と見積もられており [2]、複数回の観測を行うことで上記のような惑星を検出することが出来ると期待される。あるいは、惑星シグナルは惑星の軌道長半径に比例して（つまり公転周期の2/3乗に比例して）大きくなるため、一回あたりの観測精度が低い場合でも、長い年月をかけて観測を行えば長周期の惑星を検出できる可能性がある。

2.2 Gaia以前の観測

恒星の本格的な位置天文観測は、19世紀の終わり頃から写真乾板を用いて行われ始めたようである。その後、太陽系のごく近傍の明るい恒星に対して年周視差や固有運動、連星の軌道運動を測る観測が精力的に続けられ、20世紀半ばには、いくつかの近傍の恒星について数十年にわたる位置天文観測データが蓄積されていた。そのようなデータの中から、事実であれば最初の系外惑星発見となったであろう惑星シグナルがいくつかの恒星で検出された。有名なものは、バーナード星として知られる1.8 pcの距離にあるM型星（太陽系から2番目に近い恒星系）における検出である。1963年、Peter van de Kampは口径61 cmの望遠鏡と写真乾板を用いて実施した24年間にわたる位置天文の観測データから、バーナード星に周期24年、振幅24.5 ミリ秒角の変位を検出し、その変位は楕円軌道をもつ1.6木星質量の惑星の存在で説明できると発表した [3]。その後、van de Kamp自身が追加の観測やデータの再解析を行い、当初の主張のような楕円軌道をもつ1つの惑星ではなく、公転周期が12年と26年（のちに20年に更新）の円軌道をもつ2つの惑星が存在するとの新たな解釈を提示した [4-6]。しかし、その後、複数の研究者や研究チームにより独立した追試観測が実施されたが、今日までにvan de Kampが発見を主張した惑星の存在は確認されておらず（例えば [7-9]）、現在では彼の発見は観測の系統誤差による誤検出であると考えられている*2。

1990年代に入り、視線速度法で系外惑星が次々と発見されるようになると、発見された惑星による位置天文のシグナルを捉える試みが行われるようになった。1990年代初期に活躍した位置天文衛星Hipparcosのデータを用いた解析や、

*1 このほか、TESSやPLATOによるトランジットサーベイや、Romanによる重力マイクロレンズサーベイによっても、それぞれ数千～1万個以上の系外惑星の発見が期待されている。

*2 ちなみに、バーナード星には2018年に、視線速度法を用いて公転周期233日、3.2地球質量（下限値）の惑星候補の発見が報告され [10]、再度注目を集めたが、その後の追観測でその存在が否定された [11]。歴史は繰り返されている。

ハッブル宇宙望遠鏡のファインガイダンスセンサーを用いた観測などが行われ、いくつかの系において惑星シグナルの検出あるいは上限値の制約が行われた（例えば [12, 13]）。

近年では、地上の望遠鏡を用いてミリ秒角-サブミリ秒角精度の位置天文観測も可能となり、主に太陽系近傍の晩期M型星に対して系外惑星探索が精力的に行われている（例えば [14, 15]）。しかし、これらの探索によって発見が報告された惑星候補のうちいくつかはその後の追観測で否定されており（例えば [16]）、現時点で信頼性が高いと考えられる惑星検出の報告は1例のみである [17]^{*3}。この発見数の少なさはアストロメトリ法による惑星探索がいかに難しいかを物語っている。

3. Gaiaがもたらすブレークスルー

3.1 Gaiaで発見可能な惑星と期待されるサイエンス

ESAの位置天文衛星Gaiaは、2013年末に打ち上げられて以降、全天の18億個に及ぶ恒星の位置や明るさを約1ヵ月の頻度で精密に観測し、既に多岐にわたる研究分野において革新的な研究成果をもたらしている^{*4}。一方、アストロメトリ法を用いて系外惑星を探索する上で必要となる時系列の位置データはまだ公開されておらず、2025年後半以降に予定されている次期データリリース（Data release 4; DR4）を待つ必要がある^{*5}。では、DR4以降で予定されている時系列位置データの公開により、どのような惑星の発見が期待され、系外惑星分野にどのようなインパクトをもたらすのであろうか？

図2に、これまでに発見された系外惑星の分布

とともに、Gaiaの10年間の観測データから発見が期待される惑星の質量と軌道長半径の領域をプロットした。惑星シグナルの大きさは地球からの距離 d と主星の質量 M_s に依存（それぞれに反比例）するため、ここでは例として $d=150$ pcの太陽型星（ $M_s=1 M_\odot$; 実線）と、 $d=25$ pcのM型星（ $M_s=0.5 M_\odot$; 波線）の場合を示した。Gaiaの観測では数au程度の軌道の惑星に最も感度が高く、この軌道領域において太陽型星まわりでは木星の2倍程度、M型星まわりでは土星程度の質量の惑星まで発見可能である。

図を見てわかる通り、Gaiaの検出可能領域は既に視線速度法や重力マイクロレンズ法などで惑星が発見されている領域と重なっており、惑星の軌道領域の観点では新規性は低い。しかし、Gaiaで発見される惑星は以下の点で革新的である。まず、視線速度法は、アストロメトリ法と同様に惑星の公転に伴う恒星の軌道運動を捉える方法であるが、視線方向の1次元の軌道運動のみを測定するため軌道の傾斜角が求まらず、惑星の質量について下限値しか得られない。また、重力マイクロレンズ法では惑星の正確な質量を求めることが可能であるが、軌道については通常は天球面に射影した距離のみが測定可能であり、正確な軌道を求めることが難しい^{*6}。これらに対し、アストロメトリ法では天球面上の2次元の軌道運動を測定するため、ケプラーの第三法則と組み合わせることで、（主星の質量を別の方法で推定すれば）惑星の質量および軌道要素を全て一意に求めることが可能である。

このGaiaの検出感度が高い数auの軌道領域は、惑星が形成された時代にH₂Oの雪線（気相と固

^{*3} 電波干渉計VLBAを用いた位置天文観測により、距離10 pcの晩期M型星のまわりに土星質量の惑星が発見された。

^{*4} 本特集の巻頭言（河田氏の記事）を参照のこと。

^{*5} ただし、Gaiaで既に公開されている恒星の位置および固有運動と、Hipparcos衛星で1990年代初期に測られた位置および固有運動を比較することで、新たな系外惑星の探索や既知の惑星の軌道や質量の測定が行われている。詳細は本特集の葛原氏の記事を参照のこと。

^{*6} ただし、条件が揃えば正確な軌道を測定可能である（例えば [19]）。

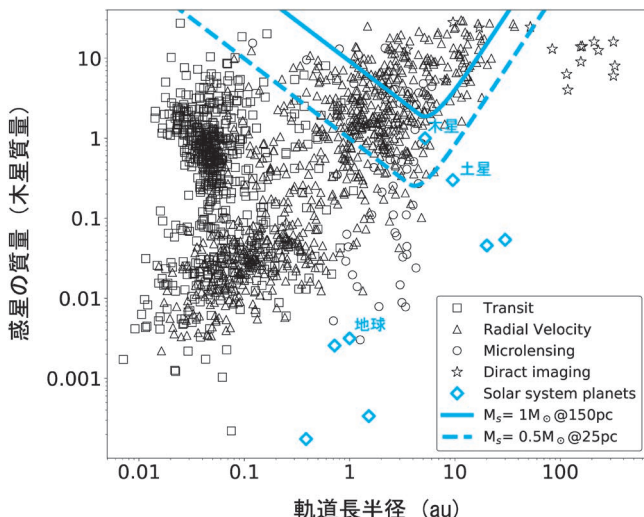


図2 Gaiaの10年間の位置天文観測データから発見が期待される惑星の質量および軌道領域（青線）。実線および破線はそれぞれ、150 pcの距離にあるG型星（1太陽質量）および25 pcの距離にあるM型星（0.5太陽質量）のまわりで検出が可能な惑星の質量の下限を表す（[2]や[18]を参考に作成）。灰色のプロットはこれまでに発見された系外惑星を示し、三角、四角、丸、および星はそれぞれ視線速度法、トランジット法、重力マイクロレンズ法、および直接撮像法で発見された惑星（データは[1]より取得）。青のダイヤモンドは太陽系内の惑星の位置を示す。

相の境界）が存在したと考えられる領域より外側に位置し、惑星の材料となる氷成分が豊富であるため、巨大惑星の誕生の現場とも考えられている。一方、惑星形成の理論モデルはまだ混沌としており、この領域において予測される巨大惑星の分布や存在頻度はモデル（例えば微惑星集積モデル[20]やペブル集積モデル[21]）によって大きく異なる。そのため、Gaiaによりこの数auの領域の正確な惑星分布が明らかとなれば、巨大惑星の形成過程の理解が大きく進む可能性がある。

また、これまでに視線速度法やトランジット法により主星の近傍をまわる巨大惑星（いわゆるホットジュピター）が多数発見されているが、その形成起源や軌道進化過程の全容はいまだにわかっていない。その一つの有力な説として、ホットジュピターは最初遠方の軌道で別の巨大惑星とともに形成され、その後別の惑星からの重力散乱を経て現在の位置へと軌道が進化した可能性が考えられている。その場合、ホットジュピターをも

つ恒星の遠方軌道に別の巨大惑星が存在する可能性が高い。これまでに視線速度法や直接撮像法などを用いてそのような天体の探索が行われてきたが（例えば[22, 23]）、探索が行われたホットジュピターをもつ系の数はまだ限られており、明確な結論はまだ得られていない。全天で観測を行っているGaiaのデータを使えば、ホットジュピターをもつ系の外側に別の天体が存在するかどうかをアストロメトリ法で網羅的に調べることが可能であり、ホットジュピターの形成機構について統計的に精度の高い議論が可能になると期待される。また、数auの軌道に複数の巨大惑星が存在する場合は、アストロメトリ法を用いて原理的に両者の軌道の相互の傾斜角を測ることが可能である。惑星の相互傾斜角は系の力学的進化についての重要な情報となるが、それが確実に測定された複数巨大惑星系はまだほとんどない。Gaiaの時代にそのようなサンプルが大幅に増えると期待される。

そのほか、Gaiaは全天の恒星をほぼ無バイアスに（スペクトル型に関係なく）観測するため、他の手法では観測が難しいスペクトル型の天体（例えば高温星や若くて活動性が高い恒星、白色矮星など）の周囲でも惑星が多数見つかる可能性があり、これまでに知られていなかったタイプの惑星の存在が明らかになる可能性もある。

3.2 DR3で公開された惑星候補

これまでのGaiaのデータリリースで公開された恒星の位置天文に関する情報は、ある参照時刻における位置、固有運動、および年周視差のみであり、時系列の位置データはまだ公開されていない。しかし、上記の位置天文情報は時系列の位置データをモデルフィットして導出されており、その際に、単星モデルではうまくデータを説明できず伴星の存在が疑われる天体については、伴星の軌道要素をパラメータに含めた連星モデルでフィットが行われている。2022年6月に公開されたGaiaのDR3において、その連星リストと連星フィットの結果（軌道要素や質量）が公開された [24]。その中には、惑星候補（伴星の質量が木星質量の20倍以下）をもつ系が72個含まれている。そのうち2つの惑星候補がいずれの手法でも未発見であり、かつ惑星の可能性が高い（誤検出の可能性がある程度排除されている）。そのうちの一つ（HD 40503）の時系列位置データのプロットを図3に示す。この系の主星は地球からの距離が約39 pcのK型矮星であり、惑星シグナルの大きさは0.25ミリ秒角、公転周期は約830日、惑星候補の質量は木星の約5.3倍である。惑星であることが確認できれば、この惑星はGaiaのデータのみでアストロメトリ法を用いて発見された初の惑星の一つとなる。なお、これらの惑星候補はGaiaの性能実証を目的として最初の34ヶ月間の観測データに対する初期解析から検出されたものである。将来的に、Gaiaの全期間のデータを用いてより詳細な解析が行われることで、非常に多くの惑星候補が検出されると期待される。

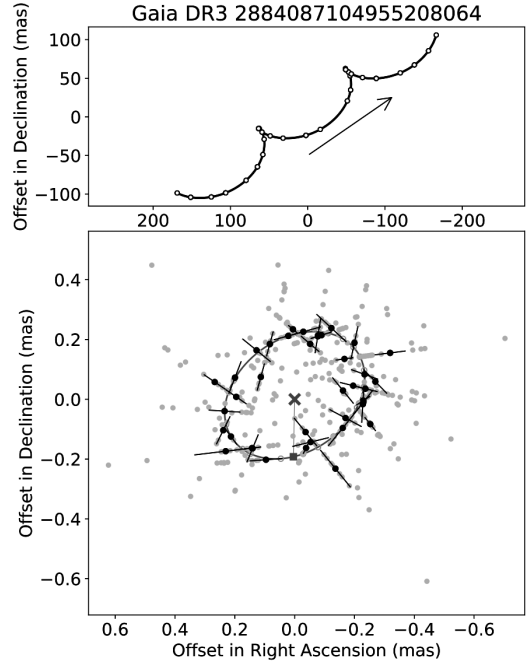


図3 Gaia DR3で公開された惑星候補天体をもつ恒星HD 40503の時系列位置データの図 [25] より転載; public license: CC BY-NC-ND 4.0). 上図: Gaiaで測られた恒星の天球面上での相対位置(白丸)および視差+固有運動モデル(実線)。矢印は時間方向を示す。下図: 上図から視差+固有運動モデルを差し引いた残差。灰色はCCD画像ごとのデータ、黒点は1回の観測(スキャン)で得られる約9枚のCCD画像のデータの平均値。実線は伴星の軌道モデル、×印は中心星の位置を示す。

一方、GaiaのEDR3で公開された情報によると、恒星が比較的明るい($G \lesssim 14$)場合、1回の観測あたりの恒星の位置決定精度は天体からの光子数の統計ゆらぎ(統計誤差)よりも位置較正誤差(系統誤差)のほうが大きく、その誤差の大きさは衛星打ち上げ前の予測を上回っている [26]。Perrymanら [2] による数万個の惑星検出という期待値は打ち上げ前の予測誤差をもとに算出されているため、実際にそのような膨大な数の惑星(候補)が検出されるかどうかは、今後どれくらい位置較正精度を改善できるかにかかっているであろう。また、実はGaiaの時系列位置データか

ら検出された惑星候補天体は、実際には惑星ではなく恒星である可能性が残されている。すなわち、もし主星のまわりを公転する天体が自ら光り輝く恒星（伴星）であった場合、主星と伴星の明るさの重心の変位が観測されるため、惑星を仮定して（伴星が暗いと仮定して）軌道フィットを行うと伴星の質量が過小評価されてしまう。Gaia衛星には天体の視線速度を測定するための分光器（波長分解能：約12000）も搭載されており、同装置を用いた分光観測からこの可能性を検証することも可能であるが、多くの場合、天体の明るさや波長分解能などの制約から完全に弁別することは困難と考えられる。そのため、Gaiaで発見される惑星候補が実際に惑星かどうかを確認するためには、地上の大型望遠鏡などを使ったフォローアップ観測が重要となるであろう^{*7}。

4. JASMINEおよびULTIMATE-Subaruへの期待

アストロメトリ法による系外惑星探索がGaiaによって大きく進展することは間違いないが、日本で現在開発が進められている、近赤外位置天文衛星JASMINE^{*8}やすばる望遠鏡用の赤外広視野高解像観測装置ULTIMATE-Subaruにおいても、その進展への貢献が期待される。Gaia衛星は可視光域で観測を行なっているため、可視光で非常に暗い晩期M型星や褐色矮星に対する感度は低い。しかし、そのような低温の天体は近赤外域では明るいいため、近赤外域で高精度な位置天文観測が期待されるJASMINEやULTIMATE-Subaruでは、晩期M型星や褐色矮星に対してGaiaに匹敵する（場合によっては上回る）位置測定精度が得られると期待される。特に、Gaia衛星はあと数年でその運用が終了する見込みであり、Gaiaの

データのみでその運用期間を大幅に超える公転周期をもつ惑星の検出は難しいが、Gaiaで発見される長周期の惑星候補を期間を空けてJASMINEやULTIMATE-Subaruを用いて観測することで、そのような長周期の惑星の発見に繋がられる可能性がある。また、Gaiaと異なる波長帯でGaiaと同じ大きさの惑星シグナルが得られるかどうかを調べることで、前節で述べた伴星由来の誤検出の可能性を検証することが可能である。晩期M型星や褐色矮星をまわる巨大惑星は別の手法で既にいくつか発見されているが、そのような軽い天体のまわりでどのようにして巨大惑星が形成されるかは未解明の謎であり、アストロメトリ法によるさらなる惑星の発見がその謎の解明に向けて重要な糸口になる可能性がある。

5. おわりに

アストロメトリ法は、視線速度法、トランジット法、重力マイクロレンズ法、そして直接撮像法に次ぐ「第5」の系外惑星発見手法として、今後系外惑星研究において大きな役割を果たすことが期待される。現在はそのアストロメトリ法による「惑星発見前夜」とも呼べる状況であり、今後の研究の進展が楽しみである。それと同時に、系外惑星研究者の一人として、この新しい時代に向けた新たな研究の準備を進める必要性を感じている。特に、日本では今後JASMINEやULTIMATE-Subaruといった近赤外の観測装置が利用可能となる見込みであり、これらの装置を用いればユニークな研究が出来る可能性がある。筆者は現在、JASMINEを用いてアストロメトリ法による系外惑星探索ができないか、小規模なワーキンググループを作って検討を進めている。興味のある方はぜひご連絡を頂ければ幸いである。

^{*7} ただし、惑星候補が誤検出である可能性を完全に排除できなくても、誤検出である確率を考慮して惑星分布の統計的な議論を行うことは可能である。

^{*8} JASMINE衛星の詳細は本特集の郷田氏の記事を参照のこと。

謝 辞

本記事の原稿に対して有益なコメントをして頂いた葛原昌幸氏および河合優悟氏に感謝致します。また、JASMINEを用いたアストロメトリ法による惑星探索の可能性と一緒に検討して頂いている、exo-JASMINEのメンバーの方々に感謝致します。

参 考 文 献

- [1] <http://exoplanet.eu> (2023.4.17)
- [2] Perryman, M., et al., 2014, *ApJ*, 797, 14
- [3] van de Kamp, P., 1963, *AJ*, 68, 515
- [4] van de Kamp, P., 1969, *AJ*, 74, 757
- [5] van de Kamp, P., 1975, *AJ*, 80, 658
- [6] van de Kamp, P., 1982, *Vis. Astron.*, 26, 141
- [7] Gatewood, G., & Eichhorn, H., 1973, *AJ*, 78, 769
- [8] Benedict, G. F., et al., 1999, *AJ*, 118, 1086
- [9] Choi, J., et al., 2013, *ApJ*, 764, 131
- [10] Ribas, I., et al., 2018, *Nature*, 563, 365
- [11] Lubin, J., et al., 2021, *AJ*, 162, 61
- [12] Benedict, G. F., et al., 2002, *ApJ*, 581, L115
- [13] Reffert, S., & Quirrenbach, A., 2011, *A&A*, 527, A140
- [14] Lurie, J. C., et al., 2014, *AJ*, 148, 91
- [15] Sahlmann, J., et al., 2014, *A&A*, 565, A20
- [16] Lazorenko, P. F., et al., 2011, *A&A*, 527, A25
- [17] Curiel, S., et al., 2020, *AJ*, 160, 97
- [18] Ranalli, P., et al., 2018, *A&A*, 614, A30
- [19] Bennett, D. P., et al., 2010, *ApJ*, 713, 837
- [20] Emsenhuber, A., et al., 2021, *A&A*, 656, A70
- [21] Ndugu, N., et al., 2022, *MNRAS*, 512, 861
- [22] Knutson, H. A., et al., 2014, *ApJ*, 785, 126
- [23] Bryan, M. L., et al., 2016, *ApJ*, 821, 89
- [24] Gaia Collaboration, et al., 2022, arXiv e-prints, arXiv:2206.05595
- [25] Holl, B., et al., 2022, arXiv e-prints, arXiv:2206.05439
- [26] Lindegren, L., et al., 2021, *A&A*, 649, A2

The Dawn of Exoplanet Discoveries through the Astrometry Method

Akihiko FUKUI

Komaba Institute for Science, The University of Tokyo, 3-8-1 Komaba, Meguro, Tokyo 153-8902, Japan

Abstract: More than tens of thousands of exoplanets are expected to be newly discovered in the entire sky by astrometry using the time-series astrometric data of Gaia, which will be released in the late 2020s. Many of them are expected to be giant planets with orbital distances of a few au, and the precise orbital and mass distribution of these planets is expected to greatly advance our understanding of the formation process of giant planets. In addition, the near-infrared astrometry satellite JASMINE and the infrared wide-field high-resolution imager ULTIMATE-Subaru for the Subaru Telescope, both of which are currently under development in Japan, will enable astrometric exoplanet searches in the near-infrared bands. Unique researches using the different wavelengths than Gaia are expected.